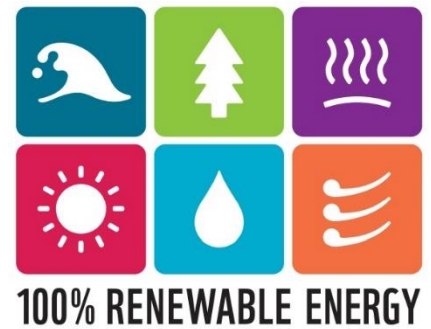




脱炭素社会に向けた 2050 年ゼロシナリオ

WWF ジャパン委託研究

2020 年 12 月 11 日

2021 年 9 月 9 日 改訂

株式会社システム技術研究所

著作：株式会社 システム技術研究所

題名：脱炭素社会に向けた2050年ゼロシナリオ

発行者：WWFジャパン（公益財団法人 世界自然保護基金ジャパン）

発行年月：2020年12月 2021年9月改訂

Author: Research Institute for Systems Technology

Title: 2050 Zero Scenarios for Decarbonizing Japan

Publisher: WWF Japan

Publishing Date: December 2020, revised in September 2021

Copyright 2020-2021 © WWF Japan. All rights reserved.

本報告書の内容に関するお問い合わせ先：

WWFジャパン 気候・エネルギーグループ

Tel: 03-3769-3509 Fax: 03-3769-1717

URL: <https://www.wwf.or.jp/>

Email: climatechange@wwf.or.jp

目次

1. はじめに	3
2. 将来のエネルギー需要	3
2.1 人口の変化	4
2.2 BAU シナリオ	4
2.3 産業構造の転換	5
2.4 鉄鋼業と水素製鉄	8
2.5 新型コロナウイルスの影響	10
2.6 輸送用エネルギー	10
2.7 エネルギー効率向上の可能性	11
2.8 エネルギー需要の想定	12
3. エネルギー供給	15
3.1 自然エネルギー導入ポテンシャル	15
3.2 バッテリー	18
3.3 ダイナミックシミュレーション（2050 年エネルギー需給）	18
3.4 太陽光発電	19
3.5 風力	20
4. 2030 年のエネルギー需給	20
4.1 2030 年のシミュレーション	20
4.2 石炭火力発電所の設備年齢	23
4.3 石炭火力代替費用の推定	25
5. 2050 年のエネルギー需給	26
5.1 2050 年のシミュレーション	26
5.2 2050 年の余剰電力の各用途への供給	28
6. シナリオのまとめ	32
7. 温室効果ガスの排出量	34
8. 自然エネルギー利用に必要な土地面積	36
9. CCUS シナリオ	36
10. 結論	38
謝辞	39
参考文献	40
参考資料	41
1) AirBus の水素ジェット飛行機	41
2) 車上 PV	42

3) 原子力について	43
------------------	----

なお、本報告ではエネルギーの単位は、主として次を使用している。

1 Jule (ジュール) = 1W 秒、kJ = 1000J、MJ = 1000kJ、1 kWh = 3.6MJ
1 GJ = 1000MJ、1 TJ = 1000GJ、1PJ = 1000TJ

K = 1000、M = 100 万、G = 10 億、T = 1 兆、P = 1000 兆
1 TOE = 4 万 1868MJ、1 MTOE = 4 万 1868TJ

TOE (石油換算トン)、MTOE (石油換算百万トン)、1TOE = 1 万 1630kWh
1 TkWh = 1000GWh、1 GWh = 1000MWh、1 MWh = 1000kWh

1. はじめに

地球温暖化に起因する気候変動によって世界各地に被害が生じている。日本ではこれまでにない大規模の台風や豪雨によって、河川の氾濫、洪水、土石流、家屋の倒壊、停電などの被害が生じている[1]。世界各国はパリ協定によって、共同でこの問題に取り組もうとしている。多くの国では 2050 年ごろを目標にして、温室効果ガスの排出ゼロを目指すことを発表している。本報告では、2050 年に日本の温室効果ガスの排出をゼロにする計画、自然エネルギー100%シナリオを検討する。

過去に、WWF ジャパンから日本の将来エネルギーシナリオについての報告書類を、2011～2013 年と 2017 年に発表している[2]。いずれも 2050 年に、原子力や CCS を含まずに、化石燃料消費をゼロにして、国内にある自然エネルギー100%を達成するシナリオである。その後、省エネルギー、自然エネルギーに関する技術の進展があり、これに対応して今回は最新の情報をベースにしたシナリオを報告する。この報告の主要なポイントは以下となる。

- 1) 2050 年までに人口が現状の 80%に減少することに伴い、経済活動の規模が減少してゆくことを想定する。また、産業構造が変化して、大量の物質を消費する経済から持続可能な経済へと変化してゆくことを分析する。
- 2) 省エネルギーによる効率向上によって、必要とするエネルギー需要を削減し、国内にある自然エネルギーのポテンシャルを考慮して、その範囲内ですべてのエネルギー需要について自然エネルギーにより 100%供給可能になることを検証する。
- 3) 2030 年についてのシミュレーション結果にもとづいて、2030 年には電力供給の自然エネルギー割合を 50%近くに高めることを検討する。この結果、2030 年までにすべての石炭火力の廃止が可能であるかを検証する。
- 4) 2050 年には、電力、熱、輸送用燃料などすべてのエネルギー需要について自然エネルギーにより 100%供給可能になることを示す。
- 5) さらに 2050 年ごろに、太陽光や風力などの自然エネルギーからの電力の余剰を利用して、蓄積した空気中の CO₂ を捕獲吸収して物質資源としてリサイクルすること (CCUS) の可能性についても簡単に検討する。

2. 将来のエネルギー需要

ここでは 2030 年、2040 年、2050 年と各年における将来のエネルギー需要を検討する。需給検討にあたっては、まず人口の減少を考慮し、各種産業の活動度を検討して、エネルギー需要を評価する。

今後、世界は気候変動の影響を減少させるため、大量の化石燃料を消費する産業社会から効率の高い省エネルギー型の脱炭素社会へと転換してゆくことを想定した。2050 年までに日

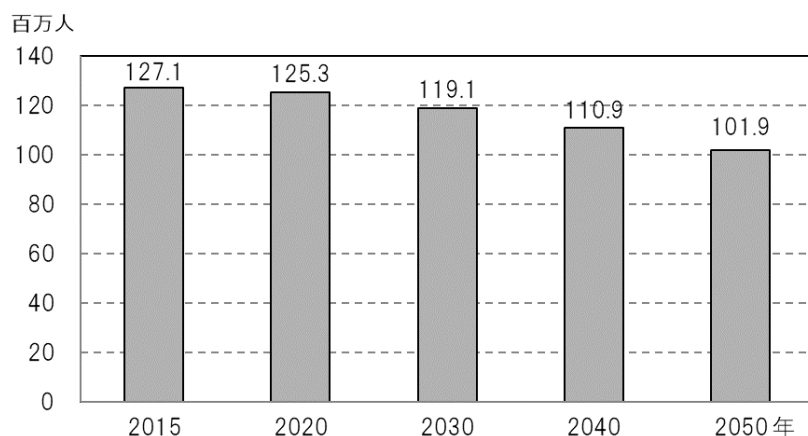
本に生じる非常に大きな変化は人口の大幅な減少であり、これはエネルギー需要に影響する。2017年に発表された公式の人口予測では、図1に示すように、2015年の127.1百万人が2050年には101.9百万人（80.2%）に減少する[3]。

また2011～2017年の実質GDP（国内総生産）の成長率はおよそ1.1%であるが、最終エネルギー需要は毎年1.2%の減少、一次エネルギー需要は毎年1.5%の減少であり、経済とエネルギー需要の間にデカップリングが進行している。ここでは将来にわたって、GDPとエネルギー消費のデカップリングが進行し、2050年まで日本はサービス産業中心の経済、効率の高い持続可能な社会へと変化してゆくものと想定した。

2.1 人口の変化

人口の減少の様子は2015年の127.1百万人から、125.3百万人（2020年）、119.1百万人（2030年）に推移してゆくものと考えられている。2015年から2030年まで15年間で6.3%の減少、2050年までに20%の減少である。

図1 人口の変化



出所：国立社会保障・人口問題研究所（2017）

2.2 BAU シナリオ

2050年までのエネルギー需要についての公式のBAU（Business As Usual）シナリオは、どのようになっているのだろうか。これまではGDPとエネルギー需要は非常に関係が深く、経済成長はエネルギー需要を増大させるものとされてきた。しかし、最近はこのような見方はなくなってきている。

日本エネルギー経済研究所 OUTLOOK2020 のレファレンスケースによると、表1のように2050年までのエネルギー需要を以下のように示している。

「2050 年の GDP は、2017 年比で 126%に増大するが、一次エネルギー需要は 2017 年の 80%に低下する」

このように公式機関もエネルギー需要と GDP とのデカップリングを認めている。デカップリングが進展することは、経済成長をしながらエネルギー需要を減少させる社会の可能性が示されているといえる。

表 1 日本エネルギー経済研究所 OUTLOOK2020 レファレンスケース

	2017	2030	2040	2050	2050/2017 (%)
GDP (2010年10億米ドル)	6, 158	6, 762	7, 291	7, 787	126
一次エネルギー (MTOE)	432	408	378	347	80
CO ₂ 排出 (100万トン)	1, 122		861	742	66
人口推計 (100万人)	126. 7	119. 1	110. 9	101. 9	80

出所：エネルギー経済統計要覧 2020 [4] なお、レファレンスケースの原典は日本エネルギー経済研究所より [5]

2.3 産業構造の転換

ここでは、日本社会の進む方向として、大量消費型社会から効率の高い情報サービス産業を中心とするサステナブルな社会への転換が進行することを想定した。エネルギー消費への影響は、この産業構造の変化に関係する活動度をもとに検討する。2050 年の最終エネルギー需要は、基準年(2015)からの活動度と効率向上を掛けて以下の式により求めるものとした。

$$\text{エネルギー需要} = \text{基準年のエネルギー需要} \times \text{活動度変化}(\%) \times \text{効率変化}(\%)$$

活動度は 2015 年を基準年として、各年におけるエネルギーを消費する社会経済活動の水準(率)を示し、効率変化は技術の適用によるエネルギー消費の水準(率)の変化を示している。この二つはお互いに独立である。それぞれ 2015 年を 100%とし、2015 年からの社会経済活動が 10%の減少となるとき活動度は 90%であるとし、エネルギー効率の向上によってエネルギー消費が 30%削減されるとき、効率変化が 70%と表現する。

各変化要因はエネルギー需要への影響の変化を示している。基準年から活動度と効率に変化がなければエネルギー需要は 100%で、変化はないことになる。

産業構造の変化を、人口減少、輸出の変化、建物の長寿命化、情報化の 4 つの要素から考えている。活動度の変化は以下のようになると想定した。

活動度変化＝人口減少×輸出の変化×建物の長寿命化×情報化

4つの要素を掛け合わせて将来の活動度を検討するものである。エネルギー多消費型産業が減少して、情報機械などの分野が拡大することを想定し、そのときに全体の生産額などが減少してGDPが減少するようなことはないことを検討している。表2には2030年～2050年の各時点で想定した各要素の変化量と総合での活動度変化（総合変化量）を産業別に示している。

表2 産業構造の変化の推定

単位：％	総合変化量＝人口減少×輸出減少×ペーパーレス×建物長寿命化														
	2030					2040					2050				
	人口減少	輸出増減	建物の長寿命化	情報化	総合変化量	人口減少	輸出増減	建物の長寿命化	情報化	総合変化量	人口減少	輸出増減	建物の長寿命化	情報化	総合変化量
産業															
農林水産鉱建設業	94	100	100	100	94	87	100	100	100	87	80	100	100	100	80
製造業															
食品飲料製造業	94	100	100	100	94	87	100	100	100	87	80	100	100	100	80
繊維工業	94	100	100	100	94	87	100	100	100	87	80	100	100	100	80
パルプ・紙・紙加工品製造業	94	98	99	95	87	87	97	100	90	76	80	95	100	85	65
化学工業（含 石油石炭製品）	94	91	99	100	84	87	81	100	100	71	80	70	100	100	56
プラスチック・ゴム・皮革製品製造業	94	91	99	100	84	87	81	100	100	71	80	70	100	100	56
窯業・土石製品製造業	94	97	94	100	85	87	94	87	100	71	80	90	80	100	58
鉄鋼・非鉄・金属製品製造業	94	91	98	100	84	87	81	97	100	68	80	70	95	100	53
機械製造業	94	116	100	106	115	87	132	100	113	130	80	150	100	120	144

表3は表2から総合変化量のみを抜き出したものである。

表3 各産業の総合変化量

単位：％	2015	2030	2040	2050	産業の活動度の変化 日常生活に関係が深い産業は人口比で80%に減少 材料資源消費に関係が深い産業は60%近くに減少する 知能情報機械産業など輸出に貢献する産業が144%に増加する
農林水産鉱建設業	100	94	87	80	
食品飲料製造業	100	94	87	80	
繊維工業	100	94	87	80	
パルプ・紙・紙加工品製造業	100	87	76	65	
化学工業（含 石油石炭製品）	100	84	71	56	
プラスチック・ゴム・皮革製品製造業	100	84	71	56	
窯業・土石製品製造業	100	85	71	58	
鉄鋼・非鉄・金属製品製造業	100	84	68	53	
機械製造業	100	115	130	144	

表2のように、2050年には人口減少のため全ての産業において活動が80%に縮小し、途上国と競合する原材料の輸出がなくなる。鉄鋼、化学工業、プラスチック製品、窯業（セメントなど）、紙製品産業の輸出は、2050年にそれぞれ30%、30%、30%、10%、5%減少す

る。建物の長寿命化設計によって鉄鋼、窯業の生産が 2050 年にはそれぞれ 5%、20%減少する。

どの産業も人口変化の影響を受けるが、日常生活に直結している農業、食品飲料、繊維の各産業の活動度は、人口変化の影響を受けて 2050 年に 80%に低下するのみである。これはひとりあたりでみれば生活水準が維持されることを意味している。

鉄鋼産業は、人口変化で需要が 80%に低下し、鋼材の 30%が輸出されていたが、これがなくなり、さらに建物の長寿化により 95%に低下するので、合成すると $80 \times 70 \times 95 = 53\%$ に低下する。鉄鋼生産は 2015 年に 1 億 400 万トンであるが、2050 年には 5512 万トンに減少する。

化学産業については、石油製品の需要が減少し、石油精製が減少し活動度は 56%に減少する。一方で機械・情報産業は、IoT、AI(人工知能)情報機器、自動運転車、ロボットなどの輸出が 150%に増大し、活動度は 144%に成長する。後述するように新型コロナの影響でテレワークやテレミーティングが増加して、一部のビジネスではそのスタイルが変化して交通需要が減少する。

シェアリングエコノミーが進展し、カーシェアリングが普及し、自動車の所有が減少するので、人口減少の程度以上に自動車の生産が減少する。乗用車は 2015 年の 5270 万台から 2050 年には 70%、つまり 3690 万台に減少する。車体の軽量化が進み、スチールに変わってカーボンファイバーが増加し、自動車の燃費向上に貢献する。

紙・パルプ産業については、2015 年には紙製品の 45%は、書籍、雑誌、新聞、書類に使用されているが、IT によるペーパーレス化が進むことなどにより、2050 年には活動度が 65%に減少する。

この活動度の変化を数値的に示すと表 4 のようになる。各産業の GDP への寄与は、日本エネルギー経済統計要覧の産業別生産高をもとに算定した。金属機械は非素材系に含めて扱われているが、ここではこれを抜き出して、2050 年までの 144%の成長を想定した。

表 4 産業別生産高

単位：兆円	2015	2018	2030	2040	2050
GDP	517	533	540	550	560
素材系	77	78	65	54	39
非素材系	215	227	230	251	278
機械製造	141	153	155	176	203
非素材ほか	74	74	75	75	75
(合計)	292	305	295	305	317

出所：省エネルギーセンター（2020）[\[5\]](#)（2030 年以降は想定値）最終行の合計＝素材系＋非素材系

素材系＝鉄鋼＋化学＋窯業・土石＋紙パルプ

非素材系＝食品・煙草＋繊維＋非鉄金属＋その他

図 2 素材系産業と非素材系産業の生産高

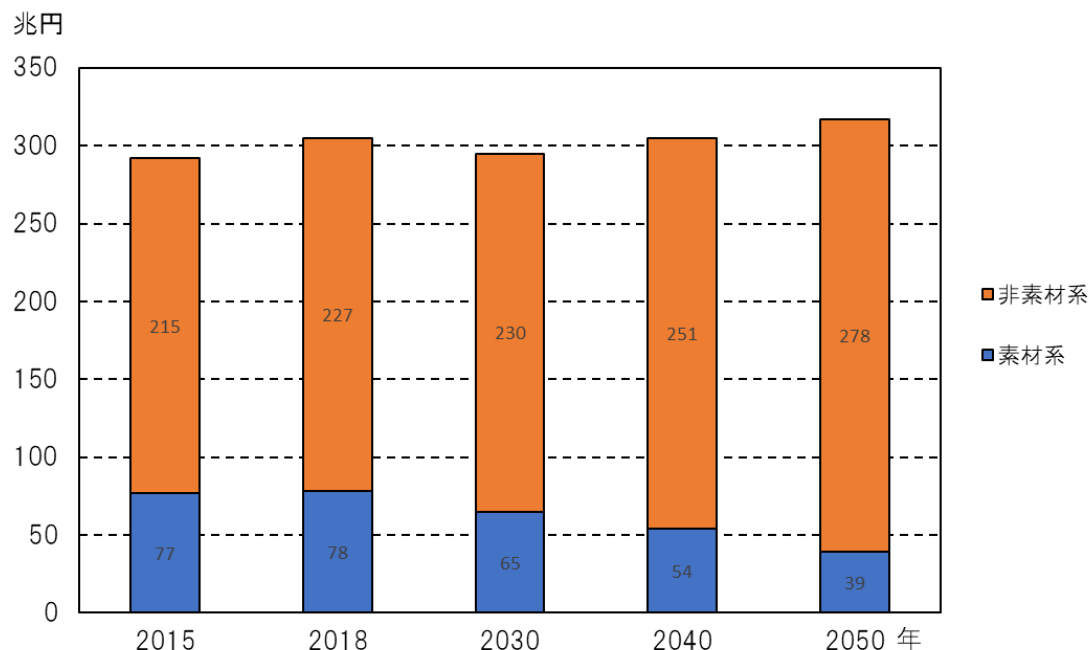


図 2 に示すように素材系の生産高は、2015 年に 26%であり、すでにそれほど大きくない。2050 年には 13%に低下することを示している。産業別生産高は 2030 年にはすこし減少しているが、金属機械産業は 144%に増加するため 2050 年の産業全体の生産高は 2015 年に比べるとすこしだけ増加する。このような産業の構造変化があっても産業全体による GDP への寄与は少し増加する。生産構造の変化によって、GDP への寄与を維持しながらエネルギー需要を減少できることを示している。

2.4 鉄鋼業と水素製鉄

鉄鋼生産量は 2015 年には 1 億 400 万トンであり、2050 年には活動度が 53%に低下するとしたので、生産量は 5512 万トンになる。なお、想定する電炉鉄の割合によって高炉鉄の生産量が変わってくる。電炉鉄は日本では現状では 20~30%であるが、米国では 70%になっている。日本では現在は電炉鉄の原料であるスクラップ鉄が余剰になり輸出しているほどである。市中に蓄積されている鉄鋼は 15 億トン程度と推定されている。電炉鉄の割合を 70%にすると、リサイクルが進展し次第に市中にあるスクラップ鉄は減少してくる。しかし、1990 年代のバブル期に生産された鉄鋼材料が豊富に市中にあり 2050 年ごろまではスクラップ鉄が十分にあり、供給不足の問題はないとされている。電炉鉄の割合を高める余地がかなりあり、2050 年ごろには 70%が電炉鉄になるものと想定した。

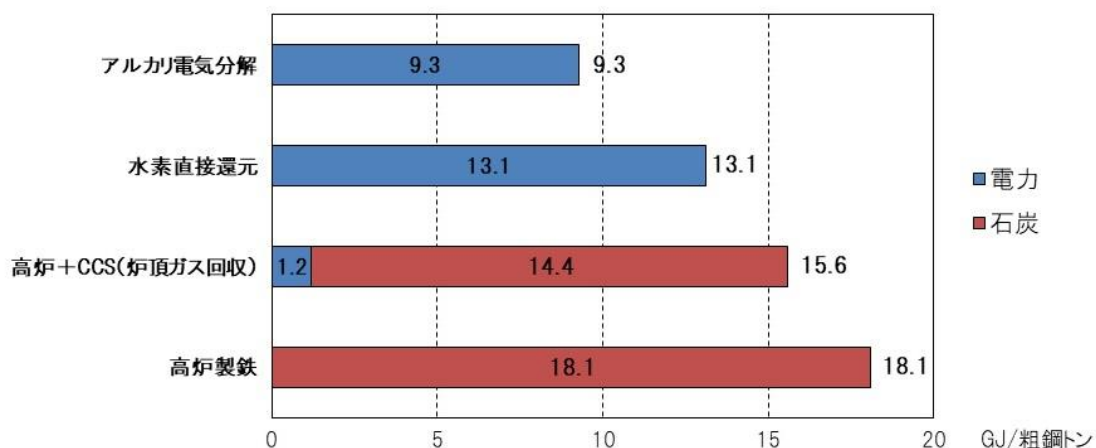
2050 年には鉄鋼生産は 5512 万トンになり、電炉鉄は 70%であり 3858 万トン、高炉鉄は 1654 万トンになるものとした。高炉鉄は鉄鉱石を石炭により還元するプロセスであるが、

2050 年には、高炉に代わって水素還元または電気分解により生産されることを検討した。

実際、鉄鋼業の高炉廃棄の流れが起こり始めている。日本製鉄は呉製鉄所の 2 基と和歌山製鉄所の 1 基の廃止を発表している。さらに八幡製鉄所、鹿島製鉄所を閉鎖すると聞く。神戸製鋼も 1 基、JFE スチールは京浜地区の高炉 1 基 400 トン削減。日本の鉄鋼業は中国など途上国との競争が厳しいようである。

将来、高炉に代替する製鉄技術として、CO₂ を排出しない生産技術に関心が集まっている。電気分解方式と水素製鉄が候補になっている。すでに小規模だが天然ガスによる直接還元製鉄が行われており、水素製鉄はこの技術の延長線上にあり、電気分解よりも取り組みやすいと考えられる。図 3 に示すように 1 単位の鉄鋼生産に必要なエネルギー原単位は、電気分解方式が水素製鉄より小さいが、水の消費量が大きいと予想されている。水素製鉄のエネルギー原単位は鉄鋼 1 トンあたり 3.64MWh (13.1GJ/t) であり、これには水の電解に必要なエネルギーを含んでいる。

図 3 鉄鋼生産技術の原単位



出所：ブッパタール研究所 [6]

2050 年に 1654 万トンの鉄鋼生産に必要な水素エネルギーは 60TWh になる。水素製鉄のエネルギー原単位は、現状の石炭による高炉の原単位よりすこし小さい。これは再生可能電力が得られるからであり、現在の火力発電から得られる電力で水素製鉄を行うことは、非効率であり、経済的には考えられない。

なお、電炉の操業は、デマンドレスポンスが可能であり、九州では昼間に太陽光が豊富で余剰電力があるとき、電炉メーカーにその電力を低価格で販売して余剰電力を処理している[7]。東京製鉄によると、ひとつの電炉の規模は 10 万 kW であり、バッチ処理プロセスなので 1 時間程度に操業時間を区切ることができるとのことである。これはデマンドレスポンスに適している。

2.5 新型コロナウイルスの影響

・エネルギー需要は一時的に減少

ヨーロッパでは主要都市がロックダウンになってエネルギー消費が減少している。IEA(国際エネルギー機関)はさっそく 2020 年のエネルギー需要が 10%ほど低下するという報告を発表した[8]。それによると、2020 年のエネルギー需要は、ロックダウンの期間と回復の状況に依存する。エネルギーの種類別に見ると、石油は 9%の減少、石炭はおよそ 8%の減少、電力の減少が 5%である。原子力も電力需要に連動して減少している。再生可能エネルギーだけは、太陽光や風力のコストが低下していて、プラントの建設予定が増加している。EU と米国では 2020 年のエネルギー需要は前年度より 10%低下するとみられている。

・リモート会議

エネルギー需要が減少するという影響があるようだ。いくつもの会議が、ZOOM などのソフトを介して遠方から行われるようになった。都会に住まなくても、地方都市に住んで、緑に囲まれた生活を満喫しながら、ネットにつながって仕事ができる。昔からそう言われていたが、急速にそれが実現しつつあるようだ。

東京都がテレワークに関する緊急調査結果を発表している[9]。2020 年の 3 月には「テレワークを導入している」と答えた企業は 24%であったが、4 月には 62.7%に増加しており、短い 1 ヶ月の間に急速に変化が生じている。

テレワークが増えると、通勤が不要になり自宅から通信回線を通じて、会議をしたり、書類を共同で作成したりできる。実際にテレワークをしてみると、なかなかいいではないかということになってきたようだ。メリットは、新型コロナウイルスに感染するリスクが減少するというだけではない。都心の高価なオフィスの面積を減らせれば、家賃も節約できる。もともと都会では、朝夕の通勤時間のラッシュアワーの満員電車は尋常でないと言われていて、その解決方法がなかったのだが、新型コロナのおかげでそのひとつの解決方法が明白になったようだ。

2.6 輸送用エネルギー

輸送部門で最大の問題は内燃機関で走行する自動車の EV(電気自動車)または FCV(燃料電池車)への転換である。イギリスは 2030 年、フランスは 2040 年までに走行中に CO2 を排出する自動車の生産を停止して、EV へ転換することを宣言している。中国も類似の宣言を行っている。

このような自動車に関する大きな変革の背後には、バッテリーと燃料電池の技術の進展がある。バッテリーは軽量化と価格低下が進展し、安全性も高くなっている。燃料電池は水素を利用して小型でも高い発電効率を実現している。この二つの技術を、自動車だけでなく、

船舶と航空分野にも適用することができ、以下のような想定を行うことができる。

乗用車の台数は 2015 年から、2030 年には 92%に、2040 年には 84%に、2050 年には 70%に減少する。そして、EV への転換が進展してゆき、その割合は 2030 年には 10%、2040 年には 40～60%、2050 年には 80～100%に達すると想定している。

貨物自動車は、2050 年には 50%が EV に、のこり 50%が FCV になるものと想定した。貨物車の EV 化は 2030 年からはじまり、2050 年には 50%に達する。FCV 化はこれよりも遅れて 2040 年代から始まるものとした。表 5 にその様子を示す。

表 5 シナリオにおける EV と FCV の普及

	2015	2030	2040	2050
乗用車（万台）	5, 270	4, 848	4, 426	3, 690
乗用車EVの台数（万台）		484	2, 655	3, 690
乗用車のEV化（%）		10	60	100
貨物車のEV化（%）		2	30	50
貨物車のFCV化（%）			10	50

2050 年に乗用車が 1 k mあたり 150～200Wh の電力消費で年間 8000 km走行すると、3690 万台の年間エネルギー需要はおおよそ 50～70TWh になる。2050 年には 600W の PV をクルマの屋根に搭載するソーラーアシストカーが導入され、自動車の年間走行エネルギーの 30%をまかなうと想定している。

飛行機と船舶については以下のように想定した。小型飛行機、小型船舶は、電気駆動または圧縮水素＋燃料電池駆動になる。大型飛行機は液体水素を利用する水素ジェット、大型船舶は圧縮水素＋燃料電池駆動が考えられる。AIRBUS 社は、200 人乗りの水素ジェットで 3200 kmを飛行する水素ジェット機を 2035 年までに製造すると発表している（巻末、参考資料）。水素技術が実現できないときには合成燃料（Power to Gas, 電力→水素→バイオマスと合成）を用いることも考えられる。

2.7 エネルギー効率向上の可能性

2050 年までに高効率 LED 照明、インバータ制御モータ、高効率 COP のヒートポンプなど効率の高い機器などが導入され、様々な技術の効率向上の可能性がある。白熱灯の生産はすでに停止された。LED 照明は、家庭、オフィス、工場、交通信号などで白熱灯だけでなく蛍光灯に代わって普及しつつある。照明用の電力消費は半分以下になるものと想像される。産業分野では 1 億台の三相交流モータが使用されているが、その主要用途は、ポンプ

38%、ファン 18%であり、この用途に回転数制御インバータを適用するとエネルギー消費は 50%以下に低下し、設備投資は 5 年以内に回収される[10]。

効率の高いアモルファトランスが製品化されている。産業部門では改正省エネルギー法のベンチマークレベルを参照して 2050 年には 70~80%の効率向上になるものとした[11][12]。2050 年には住宅およびビルについて、ZEH と ZEB のレベルの高断熱性と高効率 COP の空調設備により 50~60%のエネルギー削減となる建物が 50%に普及するものと想定し、総合的に住宅は 70%に、商業ビルは 75%に効率向上すると想定した。住宅に関するエネルギー性能を確保するための建築規制が行われるようになると思われる。

10 年前に比較して効率が 2 倍に近い電気冷蔵庫が作られている。寿命が長いので更新されるのには時間がかかっているが、2050 年までには大きな影響をもたらすと考えられる。コンピュータに使われるハードディスクは、LSI メモリーに代替されて、高速化するだけでなく、電力消費を大きく減少させる。現在この転換が進行中である。LSI メモリーがデータセンターに採用されると、直接の電力消費が減少するだけでなくデータセンターの空調電力も減少する。

乗用車は 2050 年までにすべて EV（電気自動車）になり、貨物自動車は半分が EV に残りの半分が FCV（燃料電池車）になると想定した。現状の自動車がガソリン 1L で 18 km 走行するのに対して、電気駆動になると 1km 走行に必要な電力はおおよそ 150~200Wh であり、効率が 4 倍になる。

他の輸送機関の効率向上についても進展がある。小型の船舶は電気駆動、大型船舶は水素+燃料電池になると予想される。航空機も小型機は電気駆動、大型機は水素ジェットになる。いずれも電気駆動になると効率が非常に高くなると期待される。水素ジェットは、燃料の重量が小さくなるが体積が大きくなる。鉄道は車体の軽量化、回生ブレーキなどによりエネルギー消費が 80%に、船舶については電力化により 60%に、航空機については FRP を使用した軽量化、推進装置の効率向上により 60%に減少するものと想定した。

2.8 エネルギー需要の想定

2050 年のエネルギーシナリオは、効率の高い持続可能な経済社会を目標としている。このため 2030 年には、産業構造の変化と経済的に可能な省エネルギーが進展していると想定される。表 6 には、総合エネルギー統計[13]をもとに、活動度変化とエネルギー効率の向上を組み合わせたエネルギー需要の想定を示している。

表 6 活動度変化と効率向上から計算した最終エネルギー需要

	2015 (基準年)		2030				2040				2050			
			活動度×効率		WWFシナリオ		活動度×効率		WWFシナリオ		活動度×効率		WWFシナリオ	
	エネルギー 需要 (TWh)	電力/ エネルギー 需要 (%)	活動度 変化 (%)	効率向上 (%)	エネルギー 需要 (TWh)	電力[EDA] (TWh)	活動度 変化 (%)	効率向上 (%)	エネルギー 需要 (TWh)	電力[EDA] (TWh)	活動度 変化 (%)	効率向上 (%)	エネルギー 需要 (TWh)	電力[EDA] (TWh)
最終エネルギー消費合計	3293	28			2585	790			1972	676			1387	578
産業	1256				906	284			714	233			493	179
農林水産建設業	60	19	94	95	54	10	87	94	49	9	80	90	43	8
製造業	1196				852	274			665	224			450	171
食品飲料製造業	61	39	94	90	52	20	87	87	47	18	80	80	39	15
繊維工業	25	28	94	89	26	7	87	84	23	6	80	75	19	5
パルプ・紙・紙加工品製造業	92	32	87	85	68	22	76	81	57	18	65	70	42	13
化学工業（含 石油石炭製品）	241	19	84	92	186	34	71	87	148	28	56	55	75	10
プラスチック・ゴム・皮革製品製造業	24	57	84	90	18	10	71	85	15	8	56	77	10	6
窯業・土石製品製造業	131	18	85	85	94	17	71	81	76	13	58	70	53	9
鉄鋼・非鉄・金属製品製造業	535	31	84	70	315	99	68	55	200	63	53	40	113	43
機械製造業	87	69	115	115	93	64	130	85	99	69	144	77	99	69
業務他（第三次産業）	671	51	94	95	541	304	93	76	474	240	90	65	394	218
家庭	520	51	94	95	419	239	93	76	368	189	90	65	306	169
運輸	845				719	16			416	14			194	12
旅客	503				422	15	87		246	13			112	11
乗用車	421		94	88	348	0	87	52	193	0	70	25	74	0
バス	18		94	88	15	0	87	52	8	0	80	25	4	0
鉄道	19	91	94	97	17	15	87	87	14	13	80	80	12	11
船舶	13		94	94	12	0	87	75	9	0	80	60	6	0
航空	35		94	94	30	0	87	75	22	0	80	60	17	0
貨物	342				297	1			170	1			81	1
貨物自動車 / トラック	324		94	88	267	0	87	52	148	0	80	25	65	0
鉄道	1	73	94	98	1	1	87	94	1	1	80	90	1	1
船舶	27		94	94	23	0	87	75	17	0	80	60	13	0
航空	6		94	94	5	0	87	75	4	0	80	60	3	0

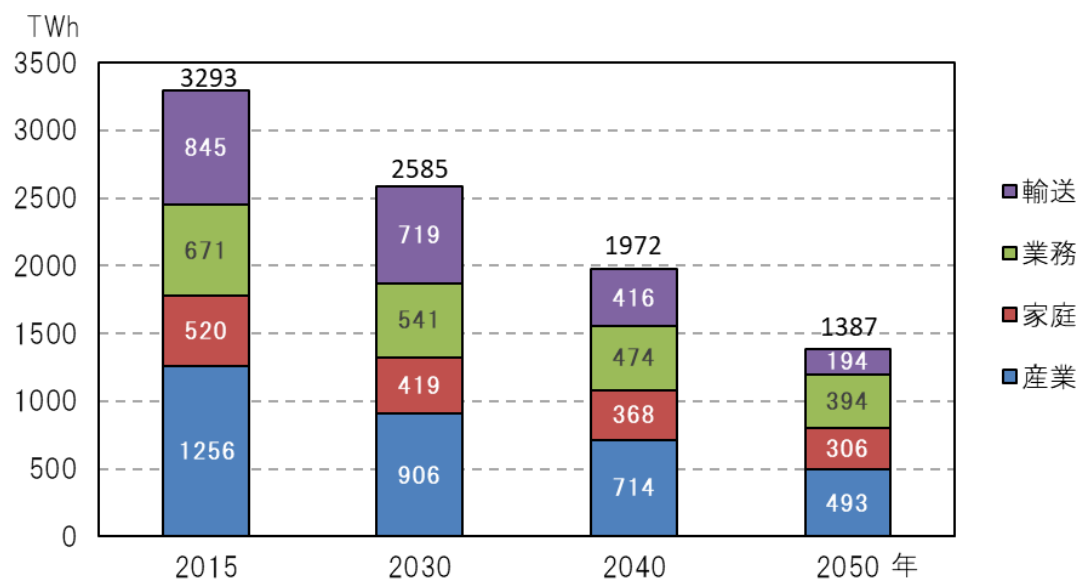
上の表から各部門の数値を取り出すと以下ようになる。

表 7 各部門の最終エネルギー需要

単位：TWh	2015	2030	2040	2050
産業	1,256	906	714	493
業務	671	541	474	394
家庭	520	419	368	306
輸送	845	719	416	194
(合計)	3,293	2,585	1,972	1,387

こうして部門ごとに見ると、産業部門と輸送部門が、家庭・業務部門と比較して大きく減少していることがわかる。産業部門の減少は産業の構造変化の結果であり、輸送部門の減少は電化による効率の向上が効いている。

図 4 各部門の最終エネルギー需要

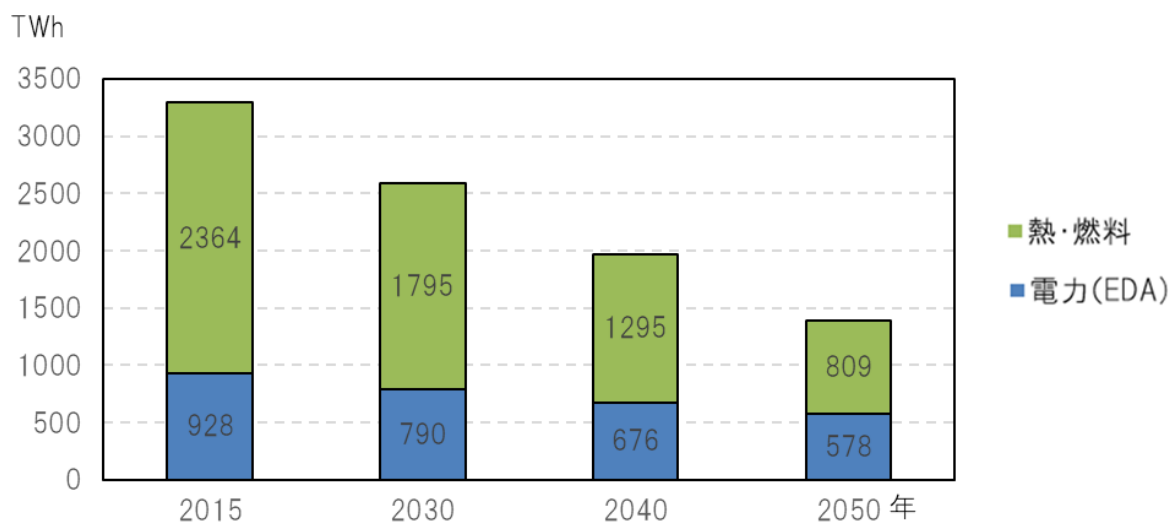


また電力需要（EDA）と熱・燃料需要を見ると、図 5 に示すように電力需要に比較して熱・燃料需要が大きく減少している。

表 8 電力需要（EDA）と熱・燃料需要

単位：TWh	2015	2030	2040	2050
電力（EDA）	928	790	676	578
熱・燃料	2,364	1,795	1,295	809
（合計）	3,293	2,585	1,972	1,387

図 5 電力需要（EDA）と熱・燃料需要



2030 年の最終エネルギー需要は 2015 年から 22%減少する。電力需要は同 15%減少し、790TWh になる。2050 年には、最終エネルギー需要は 58%の減少、電力需要は 38%の減少で 578TWh である。

電力需要を 2 つに区分

現状の家庭やオフィスなどに生じる一般的な電力需要を**電力需要 A** (EDA、照明、モータ、エアコン、情報機器などの電力需要) と呼び、これには発電された電力を負荷パターンに沿って決められた時刻に供給する。

さらに現状では化石燃料が供給されている熱需要や交通需要にも将来は電力から供給する。これを**電力需要 B** (EDB)と呼ぶ。これは時間的に柔軟に移行できる電力需要であり、EV 用、FCV 用水素生産、水素製鉄、産業用加熱、低温熱用ヒートポンプ向けなどである。

3. エネルギー供給

ここでは、将来のエネルギー供給を検討するため、最初に国内にある自然エネルギーの利用可能性を検討し、つぎにこれを各種エネルギー用途に配分利用することを検討する。

3.1 自然エネルギー導入ポテンシャル

最近の環境省の再生可能エネルギー調査では、自然エネルギーの導入ポテンシャルが示されている。毎年調査が繰り返されるにつれて、ポテンシャルの数値が大きくなっている。風力、太陽光などの賦存量と導入ポテンシャルは次のとおり。

表 9 日本国内の自然エネルギー導入ポテンシャル

種類		現状の導入量	賦存量/導入ポテンシャル		(参考) 本WWFシナリオにおける 2050年の導入量
太陽光 (GW)	住宅用	11. 2	導入ポテンシャル	209	359
	公共用	40. 6	導入ポテンシャル (＊)	2536	
風力 (GW)	陸上	3. 2	賦存量	1486	157
			導入ポテンシャル	284	
	洋上		賦存量		
			導入ポテンシャル	1120	
中小水力 (GW)			賦存量	9. 8	9
			導入ポテンシャル	8. 9	
地熱 (GW)		0. 54	賦存量	22. 2	13. 3
			導入ポテンシャル	16. 8	
太陽熱 (TWh)		5. 8	導入ポテンシャル	136	133
バイオマス (電力) (GW)		4. 1	導入ポテンシャル	7. 4	49
バイオマス (熱) (TWh)		52	賦存量	438	181
			導入ポテンシャル	127	
地中熱 (TWh)			賦存量	1403	128
			導入ポテンシャル	1050	

出所：環境省 (2020) [14] (※) 導入ポテンシャルの多くが農地であることに留意

・太陽光 (PV)

PV (太陽光) には住宅用と公共用の 2 つのタイプがある。住宅 PV は独立住宅および集合住宅の屋根と壁に設置されるものであり、公共 PV は学校、鉄道、道路、河川敷および耕作放棄地に設置されるものである。2019 年の設置規模は 51.8GW (住宅 PV 11.2GW, 公共 PV 40.6GW) である。JEP A (日本太陽光発電協会) は、導入規模は 2050 年に 200GW になるがこれは通過点でありさらに増大するとしている [15]。また、NEDO は最大導入量を 700GW としている [16]。2017 年の環境省の調査では PV の賦存量は示さず、太陽輻射があるところならどこでも設置可能とし、導入ポテンシャルは住宅 PV が 213GW, 公共 PV が 147GW としている。

以上の推定は設置可能な面積から計算しているので、PV の発電効率が上昇すれば導入量は増える。発電効率は現状では 15% 程度だが、2050 年には 30% 以上になる可能性があり、同じ面積で導入量は 2 倍以上に増大する。設置場所は駐車場や道路などに拡大できるだけでなく、農業生産と両立する農地利用であるソーラーシェアリングが進展している。人口減少に伴って、未利用地、耕作放棄地などが増大しており、太陽光発電に利用可能な面積が増大すると想定できる。また、建物の屋根だけでなく、壁、窓ガラスにも設置可能であり、風景に溶け込むようなデザイン性に優れた製品も現れることと期待される。

・風力

日本風力発電協会の従来の目標は 2030 年に 36GW、2040 年に 65.9GW、2050 年に 75GW であったが[17]、これが改定されている。2030 年の国内洋上風力発電導入量を投資判断に最低限必要な市場規模として 10GW とし、2040 年には洋上風力 30~45GW、2050 年には洋上風力 90+陸上 40=130GW としている。

・太陽熱

太陽熱温水器は 1980 年代に非常に多く普及して、1993 年にはピークに達して供給熱量は 14.7TWh となったが、2016 年には 5.8TWh 減少した。太陽熱の導入ポテンシャルは 136TWh となっている。

・地熱

地熱発電は 0.54GW であるが、賦存量は 22.2GW、2050 年の導入ポテンシャルは 16.8GW となっている。

・バイオマス

環境省の調査では、バイオマスの賦存量を 438TWh (1576PJ) としている。この全量が現実に利用可能かは不明である。歴史的にみると、木質バイオマスの最大消費は、第 2 次世界大戦中 1940 年の 75TWh であり、これは石油不足のために生じている。日本の国土の 66% は森林であり、そこに貯蔵されている木質バイオマスは 50 億m³と推定されている。これを 40 年のローテーションで植林・消費したとすると年間 349TWh に相当し、大きなバイオマス利用が期待される。しかし、その収穫コストは非常に大きく経済性に難がある。ここでは、最大で年間 4000 万m³、乾重量で 2000 万トン、熱量にすると 103TWh が利用可能と想定した。なお LCA の観点からも、これらの材については持続可能な森林管理のもとで再植林が行われ、材が製品本来の用途でカスケード利用がされたのち、最後に燃料として利用されることを想定している。

家畜、廃棄物、黒液、紙廃棄物、農業廃棄物からのバイオマスの賦存量は 3800 万炭素トン、438TWh であり、このうち導入可能量は 1100 万炭素トン、127TWh となっている。要約すると、森林から 103TWh、廃棄物から 127TWh、合計で 230TWh が利用可能とした。2050 年にはこのバイオマスを発電用に 49TWh、熱利用に 181TWh 利用するものとした。

・その他

その他の再生可能エネルギー源としては、大気、河川、地中、廃熱から得られる「周囲熱」がある。ヒートポンプを利用するとこれらの熱源から利用可能なエネルギーを引き出せる[18]。また表 9 の通り、地中熱は賦存量 1403TWh、導入ポテンシャル 1050TWh となっている。周囲熱の利用可能性は大きく、再生可能エネルギーのひとつと考えてもよく、これにつ

いては後述するようにヒートポンプによって利用する。表 10 には、10 電力会社の地域別のポテンシャルを示している。シミュレーションにはこの地域別データを利用している。

表 10 10 電力地域における自然エネルギーの導入ポテンシャルと電力需要

			北海道	東北	東京	中部	北陸	関西	中国	四国	九州	沖縄	合計
太陽光	住宅系	万 k W	1, 002	2, 576	5, 649	3, 111	688	2, 714	1, 626	876	2, 543	192	20, 978
		億 k Wh/年	114	290	677	395	77	327	199	111	313	25	2, 527
	公共系	万 k W	1, 982	1, 066	6, 521	5, 048	121	2, 202	2, 440	1, 946	7, 657	479	29, 462
		億 k Wh/年	240	132	798	643	14	273	305	248	951	64	3, 668
風力	陸上	万 k W	8, 453	4, 503	278	558	215	602	486	251	797	115	16, 259
		億 k Wh/年	2, 351	1, 320	81	152	51	159	125	64	205	31	4, 539
	洋上 (着床式)	万 k W	8, 904	3, 292	2, 530	2, 048	337	321	418	601	2, 688	1, 054	22, 194
		億 k Wh/年	2, 929	1, 046	786	670	94	95	118	176	793	334	7, 041
	洋上 (浮体式)	万 k W	11, 812	5, 540	2, 014	1, 505	9	415	3	872	1, 026	633	23, 831
		億 k Wh/年	4, 280	1, 971	714	562	3	144	1	301	350	217	8, 542
	洋上 (合計)	万 k W	20, 716	8, 832	4, 544	3, 553	346	736	421	1, 473	3, 714	1, 687	46, 025
		億 k Wh/年	7, 209	3, 017	1, 500	1, 232	97	239	119	477	1, 143	551	15, 583
中小水力		万 k W	84	275	100	151	85	24	41	27	102	0	890
		億 k Wh/年	51	178	68	96	54	15	19	16	39	0	536
電力需要 (2015年)		億 k Wh/年	321. 0	853. 3	2955. 6	1400. 3	312. 6	1517. 1	641. 4	293. 4	900. 5	84. 7	9280. 0

3.2 バッテリー

変動するエネルギー供給源に対して、蓄電設備は重要である。すでに原子力発電の補完用に開発された揚水発電が、2600 万 kW×10 時間分の規模があり、自然エネルギーの導入には有効に使われるものと考えられる。

もうひとつの蓄電技術はバッテリーである。すでに EV 用にバッテリーが大量生産されてコスト低下が進展している。このバッテリーは太陽光や風力の変動電源の安定化に重要な役割を果たすと期待されている。コストは現状の 1kWh あたり 3 万円程度から低下して、2030 年ごろには 1~1.5 万円程度になるものと期待されている。

シミュレーションでは 2030 年には 100GWh、2050 年には 300GWh のバッテリーを設置するものとした。2030 年の段階でも沖縄や北海道では、石炭火力の廃止に伴って太陽光と風力を導入するが、これにはバッテリーが必要な役割を果たしている。

なお EV 用バッテリーは 10 年間利用すると、性能が 70-80%に低下するので、中古市場にリサイクルされる。この中古バッテリーは輸送用以外には十分に利用可能であり、電力貯蔵システムに有効に利用されると考えられている。したがって、EV の大量普及を想定するなら、変動する自然エネルギー電力の間欠性を補完する現実的な方法になる。

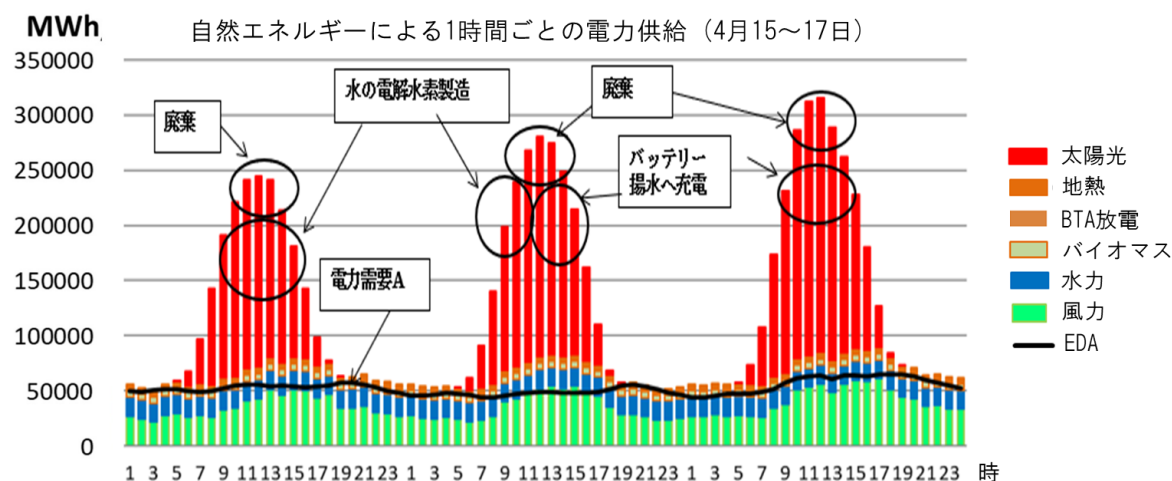
3.3 ダイナミックシミュレーション (2050 年エネルギー需給)

10 電力会社の 2017 年度の実際の 1 時間ごと 1 年間の電力需要データに比例する量を 2050 年の電力需要 A として、シミュレーションを行った[19]。太陽光、風力、水力、地熱、

バイオマス発電により発電する。揚水発電とバッテリーにより余剰を蓄電し、不足時には放電して供給する。1 時間ごとの太陽光と風力の発電量は全国 842 地点の AMEDAS2000 標準気象データを用いて計算している[20]。シミュレーションにおいて、電力網は沖縄を除いてひとつの送電網に接続しているものとした。

太陽光と風力の変動を吸収する蓄電装置として既存の揚水発電 260GWh と、バッテリーを 2030 年には 100GWh、2050 年には 300GWh を想定した。図 6 には 2050 年のケースにおいて 3 日間のエネルギー需給の様子を示している。なお、シナリオでは原子力は再稼働したものだけを想定しているため(2020 年 764 万 kW、2030 年 321 万 kW、2038 年にゼロ)、化石燃料とともに 2050 年時点ではゼロとなっている(詳しくは、巻末の参考資料 3)を参照)。

図 6 ダイナミックシミュレーションによる 2050 年におけるエネルギー需給の様子



太陽光の配分は 10 電力会社の地域別に、環境省調査の導入ポテンシャルを利用している。風力の導入ポテンシャルは非常に大きくその一部の活用を想定したが、分布については各地域の導入ポテンシャルをベースに配分している。シナリオにおける 2050 年の発電設備の規模は、太陽光 359GW、風力 157GW となっている。

3.4 太陽光発電

AMEDAS2000 標準気象データの 842 の各地点について太陽光発電量を計算した。ひとつのユニットとして 10kW の太陽光パネルを南向きに 1 年間の発電量が最大になる傾斜角に設置するものとした。このパネルに降り注ぐ 1 時間ごとの水平面太陽輻射を直達光と散乱光に分割し、傾斜面の太陽輻射をもとめて 1 年間の発電量を計算した。日本の電力会社 10 地域のそれぞれの地域にそのユニット数を配置した。太陽光発電の設備利用率は、地点

によって異なり最大 15.74%(潮岬)、最小 8.78%(肘折)、平均は 12.6%であった。

3.5 風力

風力発電は、ひとつのユニットとして出力 4MW、直径 115m、ハブ高さ 86mの風車を各地点に設置すると想定した。AMEDAS2000 標準気象データには洋上の風況データはないが、離島のサイトが含まれている。風車はカットイン風速 3m/s、カットアウト風速 25m/s とし、842 地点の風速データを用いて、べき乗法則によりハブ高さの風速を計算し、効率 40%で発電量をもとめた。風況の良い地点を選択するため設備利用率 20%以上の地点を選び出したところ 114 地点になった。風力発電のひとつのユニットの発電設備を単位として電力会社別の全国 10 地域に配分した。風力発電の設備利用率は全国平均で 30.1%になった。

4. 2030 年のエネルギー需給

本報告では、2050 年には太陽光と風力など自然エネルギーがエネルギー供給の主役になり、100%の電力供給だけでなく、熱・燃料需要にも自然エネルギーで 100%供給することを想定している。

そこで、おおよそ以下のような方針でエネルギーシナリオを検討した。

- 1) 2030 年には電力のおよそ半分を自然エネルギーで供給する
- 2) 2040 年には電力の大部分を自然エネルギーで供給する
- 3) 2050 年には電力だけでなく、熱・燃料需要にも自然エネルギーで 100%供給する

自然エネルギーは水力を含めて 2019 年現在で電力の 18%ほどに達しており、2030 年の電力の 50%を自然エネルギーにするには、 $50-18=32\%$ を追加することになる。すると既存の発電所の 32%を新しく自然エネルギー発電所に代替することになる。

CO₂ 排出の削減という点から考えると、第一に単位エネルギーあたりの CO₂ 排出量の大きな石炭利用を削減することが考えられる。石炭火力は電力供給の 26~30%を占めているので、追加する自然エネルギーの規模と同程度になっている。

4.1 2030 年のシミュレーション

まず、2030 年エネルギー需給について、実際に 10 電力地域ごとに、石炭火力を使用せずに、想定した自然エネルギーと既設のガス火力・石油火力で過不足がないか、全国 842 地点の AMEDAS2000 標準気象データを用いて 1 時間ごとの太陽光と風力の発電量についてダイナミックシミュレーションを行った。

年間電力需要は 790TWh であり、ピーク電力は 137GW になっている。10 電力地域について、太陽光、風力の規模を設定して需要と供給について検討すると、表 11,12,13 のようになった。

表 11 2030 年のシミュレーション結果（主要数値）

	供給					需要		
	太陽光 発電容量 (MW)	風力 発電容量 (MW)	蓄電容量		発電量合計 (GWh/年)	年間電力 需要 (GWh/年)	年間平均 電力 (MW)	ピーク電力 需要 (MW)
			揚水発電 (GWh)	バッテリー (GWh)				
①北海道	7,494	3,754	3	2	37,955	27,345	3,122	4,567
②東北	13,396	8,405	8	9	91,840	72,687	8,298	12,082
③関東	40,534	5,926	100	26	268,766	251,762	28,740	47,370
④中部	24,979	3,786	49	13	150,010	119,277	13,616	21,763
⑤北陸	2,957	1,234	1	3	27,641	26,627	3,040	4,532
⑥関西	16,111	2,298	54	18	128,509	129,225	14,752	23,258
⑦中国	13,288	7,520	15	8	59,845	54,634	6,237	9,460
⑧四国	8,431	1,650	6	3	29,107	24,995	2,853	4,576
⑨九州	31,474	7,091	20	12	101,507	76,703	8,756	13,952
⑩沖縄	2,094	859	0	2	9,383	7,220	824	1,332
(全国計)	160,758	42,523	260	100	895,845	790,477	90,237	136,902

太陽光は 161GW、風力は 43GW になり、総発電量は 896TWh になる。これは実際の電力需要 790TWh を上回って余剰が発生することを示している。

表 12 2030 年のシミュレーション結果（発電量）

単位：GWh/年	太陽光	風力	水力	地熱	石炭	石油	原子力	ガス火力	バイオマス
①北海道	7,240	11,099	6,649	521	0	2,889	5,593	2,798	1,166
②東北	12,970	19,258	10,274	2,612	0	3,344	6,745	33,959	2,678
③関東	46,728	17,458	24,576	547	0	19,374	0	150,152	9,931
④中部	29,056	10,453	15,428	344	0	8,917	0	83,616	2,196
⑤北陸	2,881	2,669	5,524	1	0	2,949	7,358	5,132	1,127
⑥関西	17,507	5,226	23,597	0	0	16,153	0	59,574	6,452
⑦中国	14,480	17,569	6,344	0	0	6,043	0	12,957	2,452
⑧四国	10,050	5,226	3,120	0	0	4,513	0	5,040	1,158
⑨九州	36,325	19,571	9,583	1,029	0	8,301	0	23,496	3,202
⑩沖縄	2,390	2,669	0	0	0	1,280	0	2,749	295
(全国計)	179,627	111,198	100,014	5,052	0	70,677	19,694	377,595	31,988

表 12 にあるように石炭火力はゼロになり、自然エネルギーとガス火力が大きな役割を演じている。

表 13 2030 年のシミュレーション結果（電力需要 A に対する発電割合）

単位：％	発電割合 合計(対EDA)	太陽光	風力	水力	地熱	石炭	石油	原子力	ガス火力	バイオマス
①北海道	138.8	26.5	40.6	24.3	1.9	0	10.6	20.5	10.2	4.3
②東北	126.3	17.8	26.5	14.1	3.6	0	4.6	9.3	46.7	3.7
③関東	106.8	18.6	6.9	9.8	0.2	0	7.7	0	59.6	3.9
④中部	125.8	24.4	8.8	12.9	0.3	0	7.5	0	70.1	1.8
⑤北陸	105.1	10.8	10.0	20.8	0	0	11.1	27.6	19.3	4.2
⑥関西	101.2	13.6	4.0	18.3	0	0	12.5	0	46.1	5.0
⑦中国	112.2	26.5	32.2	11.6	0	0	11.1	0	23.7	4.5
⑧四国	118.0	40.2	20.9	12.5	0	0	18.1	0	20.2	4.6
⑨九州	132.5	47.4	25.5	12.5	1.3	0	10.8	0	30.6	4.2
⑩沖縄	130.6	33.1	37.0	0	0	0	17.7	0	38.1	4.1
(全国計)	113.3	22.7	14.1	12.7	0.6	0	8.9	2.5	47.8	4.1

発電割合（全国計）をみると、太陽光は 22.7%、風力は 14.1%であり、ガス火力発電の割合が大きく、47.8%に達している。発電割合の合計が 113%であり、100%を超えているのは、電力需要 A（EDA）を基準に計算しているためである。いずれの地域でも発電割合は 100%を超えている。これは変動する太陽光と風力が、電力需要 A より大きな発電を行って、余剰電力を生み出すときがあるからである。2030 年にはこの割合は、それほど大きくないが自然エネルギーの割合が増加するにしたいが、この余剰電力の利用方法が重要になる。

実際には、太陽光の過積載方式の採用によって余剰電力を減少することができる。過積載方式はパワーコンディショナの出力を、パネルの最大出力より小さく設定することによってピーク発電量を抑制するものであり、最初からピーク発電の抑制を狙うものである。この場合には、結果としてピーク電力は抑制されて、設備利用率が高くなる。この詳細についてはシミュレーションでは扱わなかった。

いずれの地域でも主として想定した自然エネルギー、それに既設のガス火力と石油火力によって、電力需要が満たされている。原子力も数値としては小さいが稼働しているものは含んでいる。

沖縄以外の地域では、互いに連系線によって接続されており、過不足が生じたときには、互いに融通できる関係にある。北海道と本州との連携線は現状では 90 万 kW しかないが、増強される計画である。北陸電力は関西と中部から送電を受けることができる。

以下には北海道、北陸、沖縄について検討する。

・北海道

北海道へ本州側からの送電は不要であった。石炭火力が 225 万 kW、ガス火力が 57 万 kW、水力、地熱、原子力があり、シミュレーションによると、太陽光 749 万 kW、風力 375 万 kW を設置することになる。合計発電量は電力需要 A の 139%になっている。

・北陸

石炭火力 290 万 kW、ガス火力 92 万 kW があり、石油火力、水力、原子力がある。シミュレーション結果では、太陽光を 296 万 kW、風力 123 万 kW を設置するとなっている。合計発電量は電力需要 A の 105%になっている。太陽光が弱い場合には、風力を増やすほうが有効であろう。不足であれば関西電力と中部電力から送電してもらうことも考えられる。

・沖縄

石炭火力が 44 万 kW、LNG ガス火力が 54 万 kW、石油火力が 37.5 万 kW ある。このほかに具志川火力の石炭+バイオマス混焼火力が 31.2 万 kW であるが、現状ではバイオマスの混焼率はわずか 3%である。しかし将来的にはこの割合を高めて利用する可能性がある。石油火力が 37.5 万 kW あるが、沖縄本島にある石油火力は、石川火力発電所の 22.8 万 kW のみである。残りの石油火力は沖縄本島以外にあり、沖縄本島とは独立である。

シミュレーションでは沖縄本島における太陽光が 209 万 kW、風力が 86 万 kW としている。問題になるのは、夏季のピーク電力（133.2 万 kW）への対応である。LNG ガス火力+石油火力=54+22.8=76.8 万 kW だけでは十分ではない。揚水発電 3 万 kW があったが、現在は廃止されている。そこで、バイオマス発電 5 万 kW とバッテリー40 万 kW×5 時間=2GWh の設置を想定した。この結果、電力の不足は生じないことを確認した。

2030 年の全国の電力供給(合計 113.3%)に占める自然エネルギーの割合は、太陽光 22.7%+風力 14.1%+水力 12.7%+地熱 0.6%+バイオマス 4.1%であり、合計すると約 54%になる。これを発電量合計に占める割合でみると、約 48% (54%÷113.3%) となる。

いずれにしても、2030 年に電力のおよそ半分が自然エネルギーになって、石炭火力を廃止することが各地域で可能となることが、ダイナミックシミュレーションによって確認できた。2050 年には 100%自然エネルギー社会へ移行してゆくことができる。次項では現状の石炭火力の設備年齢と費用に関する検討を示す。

4.2 石炭火力発電所の設備年齢

現状では、石炭火力発電の規模は 4000 万 kW に達している。国内にある石炭火力発電所の設備年齢データを 2019 年時点で年齢別にまとめると表 14 のようになった。これには、10 電力地域の電力会社の保有するものだけでなく、その地域にある企業の石炭火力をすべて含んでいる。図 7 にはそのグラフを示す。

表 14 10 電力地域の石炭火力発電所の設備年齢（10 万 kW 以上のみ）

単位：万kW	40年以上	30年以上	20年以上	10年以上	10年未満	合計	40年以上を除く
北海道	83	155	155	240	0	240	157
東北	95	215	750	825	182	1,007	912
東京	0	0	0	272	176	448	448
中部	0	0	240	440	11	451	451
北陸	50	50	290	290	0	290	240
関西	50	50	75	395	0	395	345
中国	33	233	373	424	99	523	490
四国	66	66	346	377	0	377	312
九州	18	288	472	638	122	760	743
沖縄	0	31	62	106	0	106	106
(合計)	394	1,087	2,763	4,007	590	4,597	4,203

（全発電所合計は、「10 年以上」＋「10 年未満」。右端の「40 年以上を除く」は合計から「40 年以上」を引いたものを示す）

40 年以上の年齢の設備が多いのは東北であり、少ないのは沖縄である。東京では 20 年以上の設備はないことがわかる。

図 7 10 電力地域の石炭火力発電所の設備年齢分布

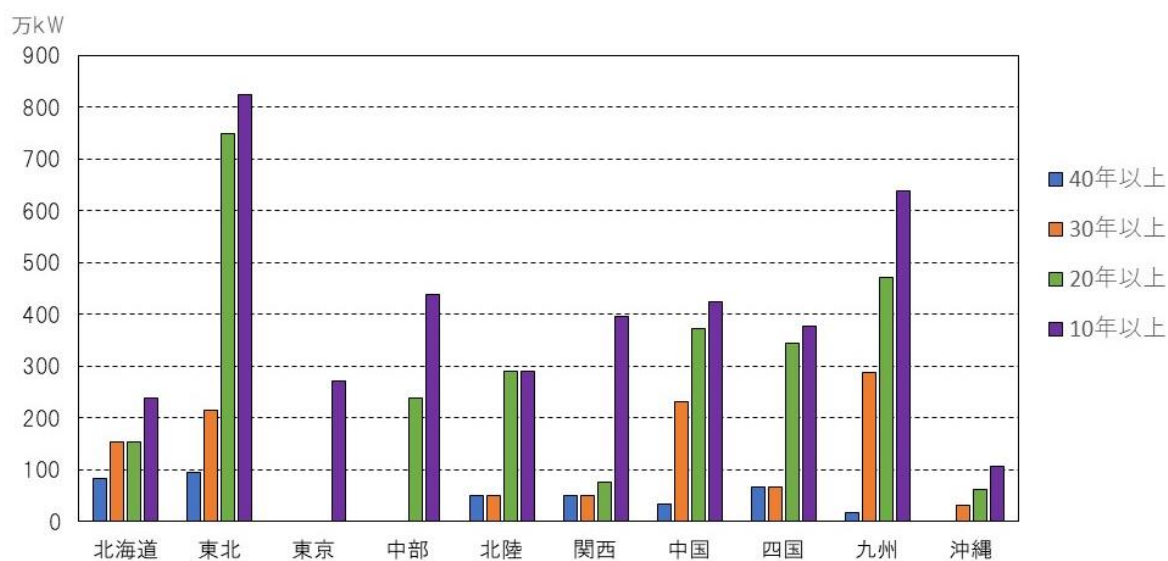
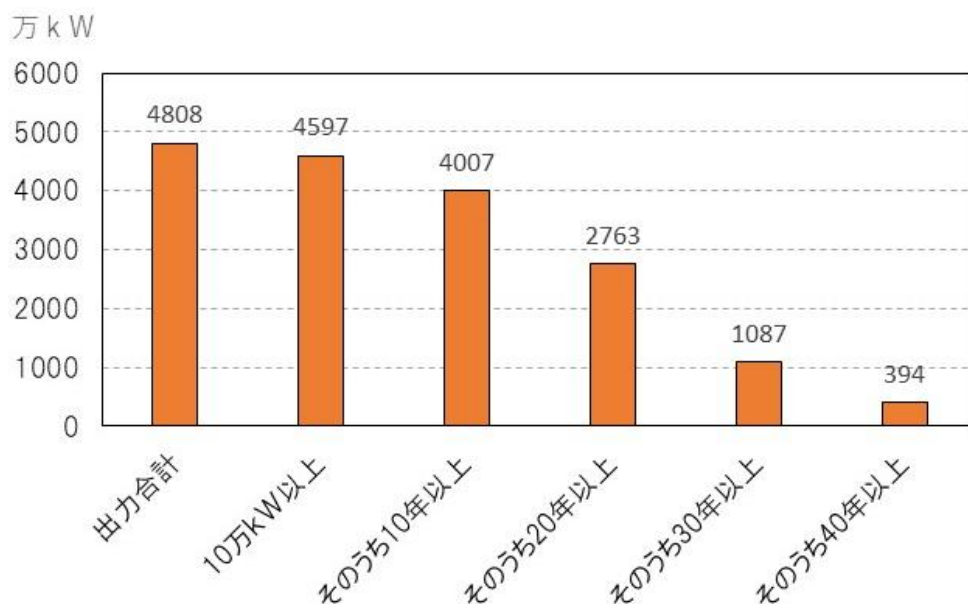


図 8 全国の石炭火力発電所の設備年齢別規模



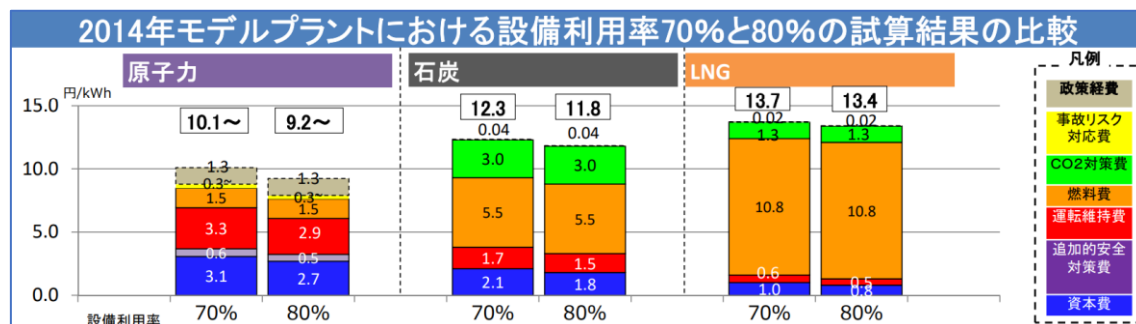
10 万 kW 以上の石炭火力発電所合計は 4597 万 kW であり全石炭火力出力合計 4808 万 kW の 96%になる。図 8 には全国の 10 万 kW 以上の発電所の 2019 年現在の年齢別構成を示している。10 年後の 2030 年には、20 歳以上の発電所が 4007 万 kW になり、30 歳以上のプラントが 2763 万 kW になる。2030 年時点で 20 年以上の発電所をすべて閉鎖とすると 4007 万 kW の廃止であり、83%の廃止になる。

10 年以上使われている石炭火力の設備利用率は 60～75%程度である。ガス火力の設備利用率は 35～50%以下と低くなっており、余力がありおよそ 2 倍の稼働が可能であることが多い。設備利用率が低い理由は、ガスの燃料コストが石炭より高いためと思われる。

4.3 石炭火力代替費用の推定

現状の石炭火力による発電（260TWh）に関して、全国規模でみるときのコスト増加を検討する。政府の 2015 年の発電コストに関するワーキンググループの報告によると以下のようになっている。

図9 発電コストに関するワーキンググループの報告 [21]



石炭火力とガス火力を同じ設備利用率で比較すると、

設備利用率が70%のとき、1 kWh あたりのコスト差 = $13.7 - 12.3 = 1.4$ 円

設備利用率が80%のとき、1 kWh あたりのコスト差 = $13.4 - 11.8 = 1.6$ 円となっている。

これを用いて年間費用の差を計算すると、 $260\text{TWh} \times (1.4 \sim 1.6 \text{ 円}) = 3640 \sim 4160$ 億円となり、石炭火力のすべてをガス火力に転換した場合の年間の負担増はこの程度である。

石炭火力発電の設備コストは1 kW あたり 23 万円とされており、40 年を寿命とした場合には年間コストの 10% 以下であり、これに対して燃料コストは年間コストの 46% になっている。石炭火力は燃料コストの占める割合が大きいことが特徴である。したがって、20 年の寿命で設備を廃棄したとしても失われるコストは相対的にはそれほど大きくない。これを太陽光や風力に切り替えれば、燃料コスト負担はないので、収益構造は大きく変わってくる。2030 年ころには、太陽光や風力の 1 kWh あたりコストは 10 円前後になると予想され、石炭火力よりも低コストであり、石炭火力の廃止は経済的にも非常に有効と考えられる。

5. 2050 年のエネルギー需給

2050 年については、電力需要 A への供給を自然エネルギー 100% にするだけでなく、電力需要 B (熱・燃料の用途) に向けても自然エネルギー電力を供給する。以下の表は、2050 年のシミュレーション結果である。

5.1 2050 年のシミュレーション

2050 年時点のシミュレーション結果を次に示す。

表 15 2050 年のシミュレーション結果（主要数値）

	供給					需要		
	太陽光 発電容量 (MW)	風力 発電容量 (MW)	蓄電容量		発電量合計 (GWh/年)	年間電力 需要 (GWh/年)	年間平均 電力 (MW)	ピーク電力 需要 (MW)
			揚水発電 (GWh)	バッテリー (GWh)				
①北海道	21,240	18,431	3	4	95,005	19,981	2,281	3,337
②東北	25,920	26,131	8	9	125,927	53,111	6,063	8,828
③関東	86,620	19,062	100	117	213,725	183,958	21,000	34,613
④中部	58,070	19,142	49	43	154,777	87,154	9,949	15,902
⑤北陸	5,760	7,448	1	6	36,624	19,456	2,221	3,311
⑥関西	34,990	12,525	54	70	103,820	94,422	10,779	16,994
⑦中国	28,940	19,265	15	20	87,462	39,920	4,557	6,912
⑧四国	20,090	6,909	6	6	51,383	18,264	2,085	3,344
⑨九州	72,600	23,339	20	12	172,129	56,046	6,398	10,194
⑩沖縄	4,780	4,253	0	10	19,098	5,275	602	974
(全国計)	359,010	156,505	260	300	1,066,847	577,587	65,935	100,032

太陽光は 359GW、風力は 157GW になり、総発電量は 1067TWh と年間電力需要 A (578TWh) の 184%となる。

表 16 2050 年のシミュレーション結果（発電量）

単位：GWh/年	太陽光	風力	水力	地熱	石炭	石油	原子力	ガス火力	バイオマス
①北海道	20,520	54,505	6,915	13,066	0	0	0	0	0
②東北	25,096	59,873	16,276	20,285	0	0	0	0	4,398
③関東	99,856	56,156	29,565	8,446	0	0	0	0	16,424
④中部	67,549	52,853	19,669	7,434	0	0	0	0	7,145
⑤北陸	5,612	16,104	7,096	6,312	0	0	0	0	1,500
⑥関西	38,023	28,491	25,350	490	0	0	0	0	8,573
⑦中国	31,535	45,007	6,664	865	0	0	0	0	3,375
⑧四国	23,947	21,884	3,705	227	0	0	0	0	1,619
⑨九州	83,788	64,414	11,137	8,048	0	0	0	0	4,741
⑩沖縄	5,456	13,213	0	0	0	0	0	0	429
(全国計)	401,382	412,502	122,341	81,566	0	0	0	0	49,056

2050 年には、石炭火力、石油火力、原子力の発電量はゼロになっている。太陽光と風力の発電量はそれぞれおよそ 401TWh と 412TWh となっている。

表 17 2050 年のシミュレーション結果（発電割合）

単位：％	発電割合 合計(対EDA)	太陽光	風力	水力	地熱	石炭	石油	原子力	ガス火力	バイオマス
①北海道	475.5	102.7	272.8	34.6	65.4	0	0	0	0	0
②東北	237.1	47.3	112.7	30.7	38.2	0	0	0	0	8.3
③関東	116.2	54.3	30.5	16.1	4.6	0	0	0	0	8.9
④中部	177.6	77.5	60.6	22.6	8.5	0	0	0	0	8.2
⑤北陸	188.2	28.8	82.8	36.5	32.4	0	0	0	0	7.7
⑥関西	110.0	40.3	30.2	26.9	0.5	0	0	0	0	9.1
⑦中国	219.1	79.0	112.7	16.7	2.2	0	0	0	0	8.5
⑧四国	281.3	131.1	119.8	20.3	1.2	0	0	0	0	8.9
⑨九州	307.1	149.5	114.9	19.9	14.4	0	0	0	0	8.5
⑩沖縄	362.0	103.4	250.5	0	0	0	0	0	0	8.1
(全国計)	184.7	69.5	71.4	21.2	14.1	0	0	0	0	8.5

上の表に示すように、全国についての電力需要 A に対する発電量の割合は 184% になっており、いずれの地域でも自然エネルギーによって、需要が満たされている。バッテリーの容量の配分は、試行錯誤的に各地域の電力需要 A に比例して配分しているので、最適化されていない。北海道では揚水発電があり、その蓄電機能を利用しているが、バッテリーも 4GWh を用意している。

沖縄以外の 9 電力地域は連系線で接続されており、互いに電力の融通ができる。多くの地点の太陽光や風力の発電が多様に集合されるので、気象条件によって生じる変動を抑えることができる。これに対して沖縄は外部と送電線がつながっていないので、自給自足することになり、変動を吸収するために蓄電装置が大きなものになってくる。沖縄にはかつて海水揚水発電があったが廃止されているので、10GWh のバッテリーを設置するものとした。

沖縄では沖縄本島以外の離島では発電が石油火力によって行われている。このシミュレーションでは沖縄本島の電力需給を検討しただけであり、個別の離島の発電の過不足を検討できていない。離島の発電規模は数千～数万 kW 程度と小さく、内燃機関が多い。将来は、基本的には太陽光+風力+バッテリーで代替するものと考えられるが、不足が生じる可能性があり、ここでは検討できていない。不足分の補完はバッテリーだけでなく、バイオマス発電、水素の供給+燃料電池による発電、海底ケーブルによる送電などが候補としてあり、経済性の比較によって決定されることになると思われる。

5.2 2050 年の余剰電力の各用途への供給

2050 年のシナリオでは、余剰電力の利用と太陽熱、バイオマス、車上 PV、周囲熱の利用を以下のように想定した。余剰電力は EV 向け電力、産業の熱需要における直接加熱に供給し、さらに水電解により水素を生産しトラック、航空機、船舶、水素製鉄へ供給する。以下にその内容を検討する。

バイオマスは、産業用の加熱需要、業務用と家庭用の低温熱需要に使用するものと想定し

た。この低温熱需要には、さらにヒートポンプ（業務と家庭用に COP=5、産業用に COP=3）と周囲熱（Ambient Heat, 大気熱、地中熱など）を計上している。この低温熱需要は温水・暖房、乾燥、洗浄などである。

交通用には余剰電力を乗用車 EV とトラック用 EV および FCV に供給し、船舶には水素＋燃料電池、航空には水素ジェットなどが利用される。水素＋バイオマスによる Power To Gas もありうるが、後述のように、Airbus 社が 2035 年までに水素航空機を開発すると発表しており、航空機は水素利用としてよいと考えられる。

表 18 電力需要以外への余剰電力、バイオマス、周囲熱、太陽熱の配分例

単位：TWh	熱需要	供給							
		余剰電力				その他の供給			
		電力加熱 /EV	水素		ヒート ポンプ	周囲熱	車上 P V	バイオ マス	太陽熱
産業			H ₂	Loss					
高温熱（製鉄）	138	68	70						
中温熱	72	37						35	
低温熱	101				(*)1 10	20		71	
業務部門									
低温熱（温水・暖房）	176				(*)2 12	48		53	63
家庭部門									
低温熱（温水・暖房）	137				(*)2 9	36		22	70
運輸部門		EV	FCV						
旅客	98								
乗用車	70	49					21		
バス	4	4							
鉄道	1	1							
海運	6	3	3	2					
航空	17		17	15					
貨物	82								
トラック	65	23	23	22			19		
鉄道	0								
海運	14	7	7	5					
航空	3		3	2					
合計	804	192	123	46	31	104	40	181	133
余剰電力合計		346 + 46 (H ₂ loss)							
余剰電力損失		87							

(*)1 COP=3 を想定、(*)2COP=5 を想定

表 18 には、熱・燃料の最終用途に余剰電力、太陽熱、バイオマス、車上 PV、周囲熱を供給する様子を示している。

水素製鉄としては余剰電力 70TWh から水電解で水素を作り、1653 万トンのスチール生産を計上している。バイオマスは発電に 49TWh（表 16）、熱に 181TWh、合計で 230TWh としている。このほかに周囲熱を 104TWh、太陽熱を 133TWh、車上 PV40TWh としている。

このシナリオでは、水素転換損失と、余剰電力の利用損失を計上している。前者は水電解の効率（80％）と燃料電池の発電効率（60％）から生じる損失である。後者は余剰電力をす

べて利用しないためである。すべてを利用しようとする水電解設備などが非常に大きくなり、その稼働率は低下する、そのため時間持続曲線を作成してみると、ピーク時の 50% の設備で 82% の余剰電力を利用できることが判明とした。このとき 18% が損失になる（実際には発電抑制になる）時間持続曲線は、図 10 に示すような曲線であり、横軸に 1 年間の時間を、縦軸に余剰電力を大きい順にリストアップした曲線である。

図 10 余剰電力の時間持続曲線

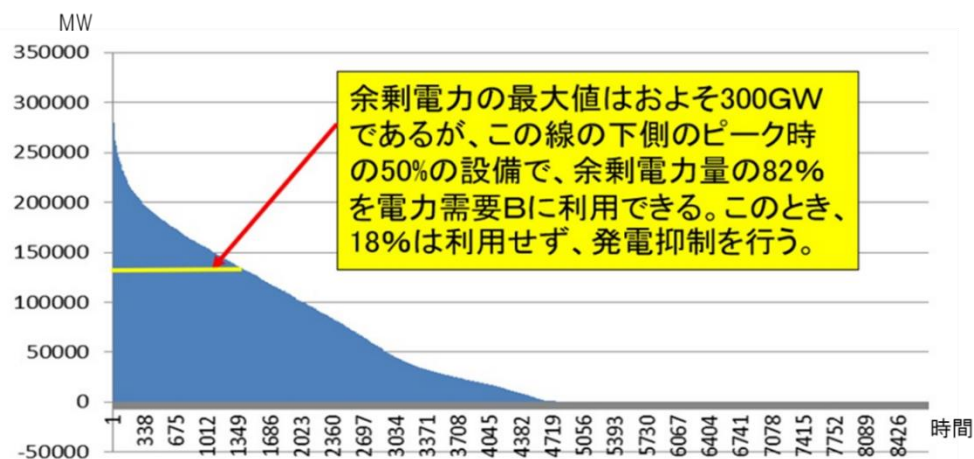


図 11 1 年間の 1 時間ごとの余剰電力の発生状況

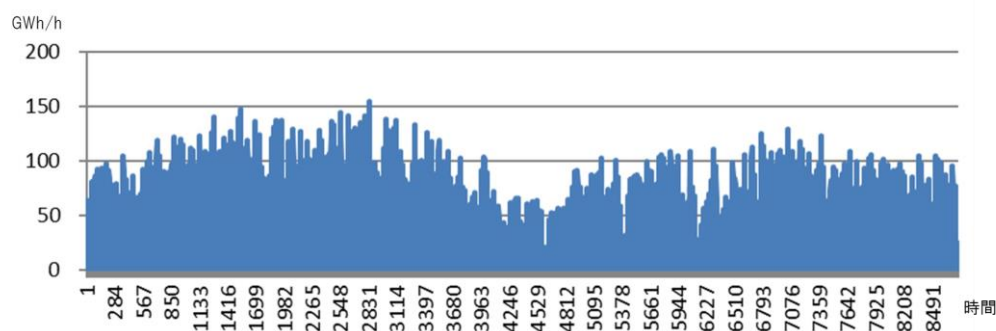


図 12 余剰電力の月別発生量

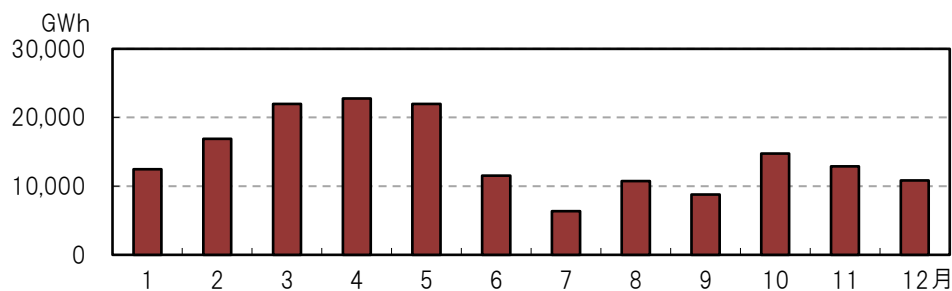


図 11 と図 12 は、1 月から 12 月までの 1 年間の余剰電力の発生状況を示している。余剰電力のひとつの問題点は、グラフの中央付近の 6～7 月の梅雨の季節に非常に小さくなることである。太陽光が減少し、夏季には風力からの発電量も小さいので、これに対処するには電力貯蔵設備が必要になる。しかし、天気予報をもとにしたデマンドレスポンス、産業の生産調整、ダイナミック・プライシングなどによって、蓄電設備の規模を小さくできると期待される。

6. シナリオのまとめ

以上の 2050 年までのシミュレーション結果をとりまとめると、表 19 のようになる。

表 19 エネルギーの需要と供給の構造

単位: TWh		2015	2030	2040	2050
供給	石炭	1,459	368	291	0
	石油	2,603	1,346	626	0
	ガス	1,298	1,047	775	0
	原子力	9	19	0	0
	太陽光	35	179	311	401
	風力	8	111	249	412
	水力	87	100	110	122
	地熱	4	5	30	82
	バイオマス電力	8	31	32	49
	バイオマス(熱)	0	20	120	181
	太陽熱	3	10	40	133
	周囲熱	0	0	50	104
	車上PV	0	0	5	40
	(計)	5,514	3,236	2,639	1,524
損失	発電・水素転換ロス	-2,220	-651	-667	-137
	うち余剰電力ロス			-12	-87
最終 需要	電力需要	928	790	676	578
	熱・燃料需要	2,364	1,795	1,295	809
	(計)	3,293	2,585	1,972	1,387
電力需要に占めるRE割合(%)		15.3	53.9	108.2	184.4
発電量に占めるRE割合(%)		15.3	47.6	73.3	100

2030 年の電力需要 A (EDA) に対する自然エネルギーの割合は 53.9% になった。2040 年には 108% になり、2050 年には 184.4% になる。これを発電量合計に対する割合で見ると、2015 年に 15.3%、2030 年には 47.6%、2040 年には 73.4%、2050 年には 100% となる。

化石燃料を含めた発電量は 2030 年から 100% をこえている。この余剰分は、当初は発電抑制によって回避されるが、次第にその規模は拡大してゆき、余電力需要 B に供給される。

図 13 一次エネルギー供給構造の推移

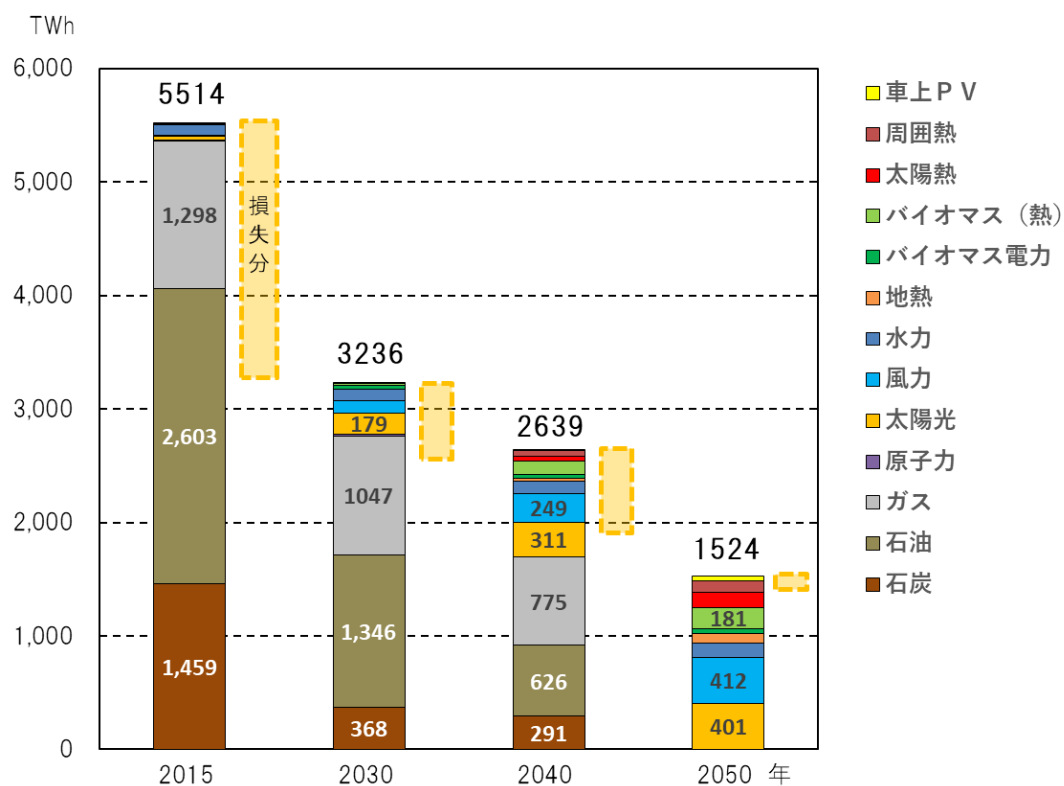


図 13 には、損失を含めて供給される電力と熱の一次エネルギー量を示している。2015 年から 2030 年までのエネルギー量には、化石燃料による発電損失などが多く含まれているので、2050 年の量に比べると非常に大きく見える。発電損失と転換損失の大きさを黄色のボックスで示している。化石燃料による発電は投入したエネルギーの 60% 近くが損失になり、大きな割合を占めている。それが自然エネルギーによる発電に代わってゆくとき、このような発電損失が非常に小さくなることを示している。この発電損失を除いた部分が、最終エネルギー需要を示している。2050 年にもこのような損失が少しあり、それは水素転換と余剰電力の発電抑制分である。

一次エネルギー量は、2015 年と比較して、2030 年には 41.3%、2040 年には 52.1%、2050 年には 72.4% だけ減少する。

図 14 発電構成の推移

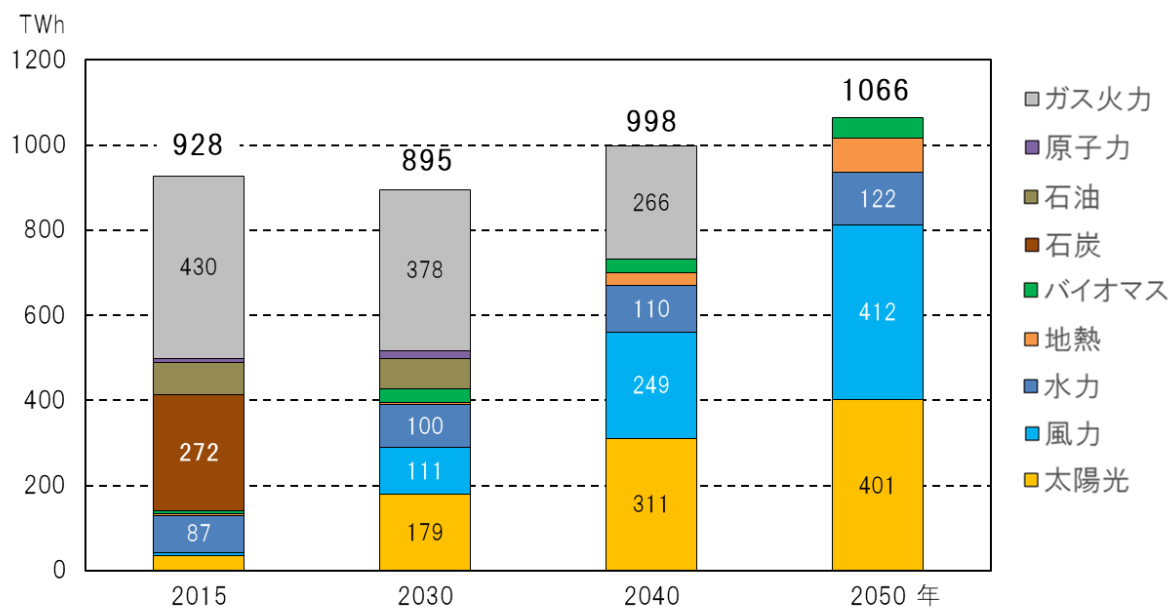


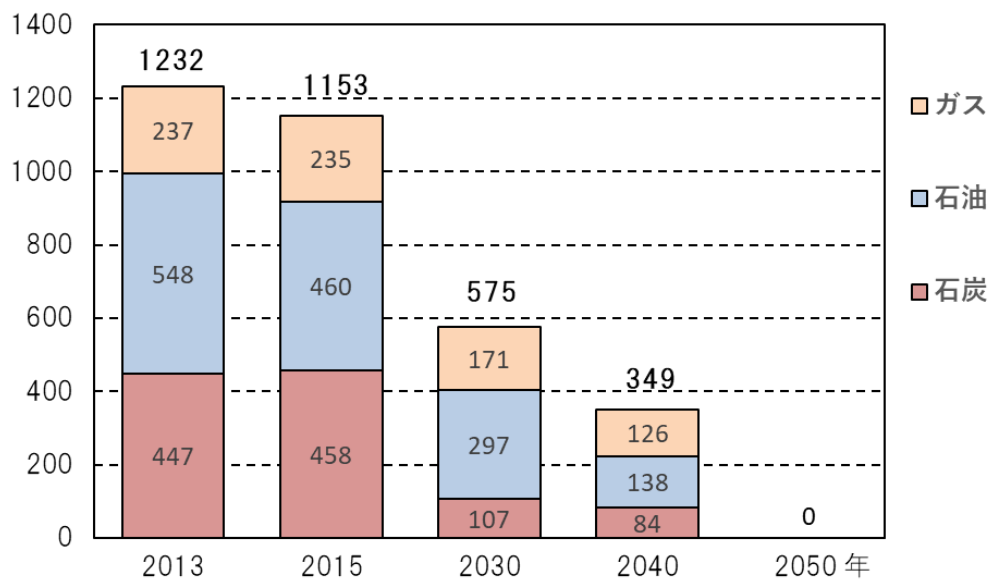
図 14 には発電構成の時系列の変化を示している。2050 年に向かって、太陽光と風力を中心に自然エネルギーによる電力供給が増加してゆく。中間期の 2030 年～40 年には、ガス火力が大きな割合を占めている。これは自然エネルギーが増大するのに時間が必要であり、その期間の CO₂ 排出を小さくする意味で重要である。

7. 温室効果ガスの排出量

以上のシナリオに沿って 2050 年までのエネルギー起源の CO₂ の排出量を算出すると図 15 のようになった。2030 年には 5.75 億トン、2040 年には 3.49 億トンになり、2050 年にはゼロになる。2013 年を基準にすると、2030 年にはマイナス 53.3%、2040 年にはマイナス 71.7%となる。

図 15 シナリオの二酸化炭素排出量（エネルギー起源）

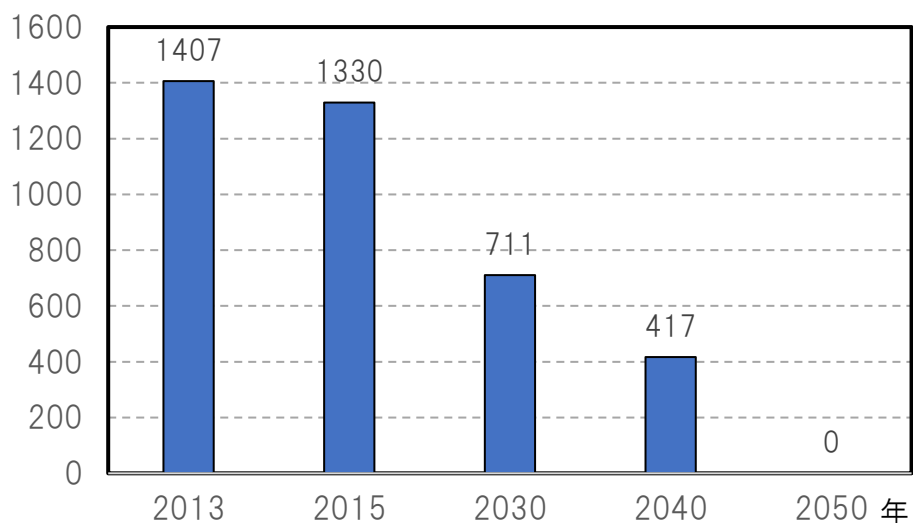
百万トンCO₂換算



さらに、非エネルギー起源の CO₂、そして CO₂ 以外の温室効果ガス（メタン、一酸化二窒素、HFC など）を含めた温室効果ガス全体の排出量で見ると、図 16 のようになる。ただし、エネルギー起源 CO₂ 以外のガスについては、日本政府が掲げる 2030 年の削減目標（2013 年比 46%削減）における想定を踏襲し、2030 年以降は 50 年ゼロとなるよう直線的に減少することとした。図 16 より、2013 年を基準年とすると、2030 年にはマイナス 49.4%、2040 年にはマイナス 70.3%の削減となる。

図 16 シナリオの温室効果ガス排出量

百万トンCO₂換算



8. 自然エネルギー利用に必要な土地面積

現在、日本の国土の利用状況は、森林 66%、農地 13%、住宅 6%、道路 3%である。自然エネルギーの立地密度は、戸建て住宅 PV が 100W/m²、共同住宅 PV や公共 PV は 83.3W/m² [14]、陸上風力は 10W/m²、洋上風力は 8W/m² [23] である。

2050 年のシナリオでは太陽光 360GW の設置に必要な面積は、国土面積に対して住宅 0.59+公共 0.47=1.06%であり、風力 156GW では 4.69%である。太陽光に必要な面積は、太陽光パネルの発電効率が向上すれば減少する。現状では効率はおよそ 15%であり、2050 年ごろには 30%になれば必要な面積は半減する。また、壁面に設置すれば面積はほとんどなくなり、農地の複合利用であるソーラーシェアリングの場合には、この計算は農地にふくまれることになる。風力の場合には、風車を通過した風が上空のエネルギーを捕獲して再び発電ができるための距離から計算されている。風力の場合はこの土地のほとんどを農地や牧場など他の用途に利用できる。もちろん風力発電装置の効率向上の余地があり、この必要面積は減少すると期待できる。

表 20 自然エネルギー設備が国土面積に占める割合

供給源		立地	設備容量 (GW)	立地密度 (W/m ²)	面積 (km ²)	国土に占める割合 (%)
太陽光	住宅PV	戸建て住宅	166	100	1,660	0.44
		共同住宅など	47	83.3	564	0.15
	公共PV	学校、耕作放棄地など	147	83.3	1,765	0.47
風力		陸上	71	10	7,100	1.88
		洋上	85	8	10,625	2.81

(国土は 37.8 万 km² として計算)

(2050 年は太陽光 359GW、風力 157GW であるが、立地ごとに分類すると四捨五入の関係で表のとおり合計値が

360GW,156GW とそれぞれ変化してしまう。ここでは太陽光 360GW、風力 156GW として計算していることに留意)

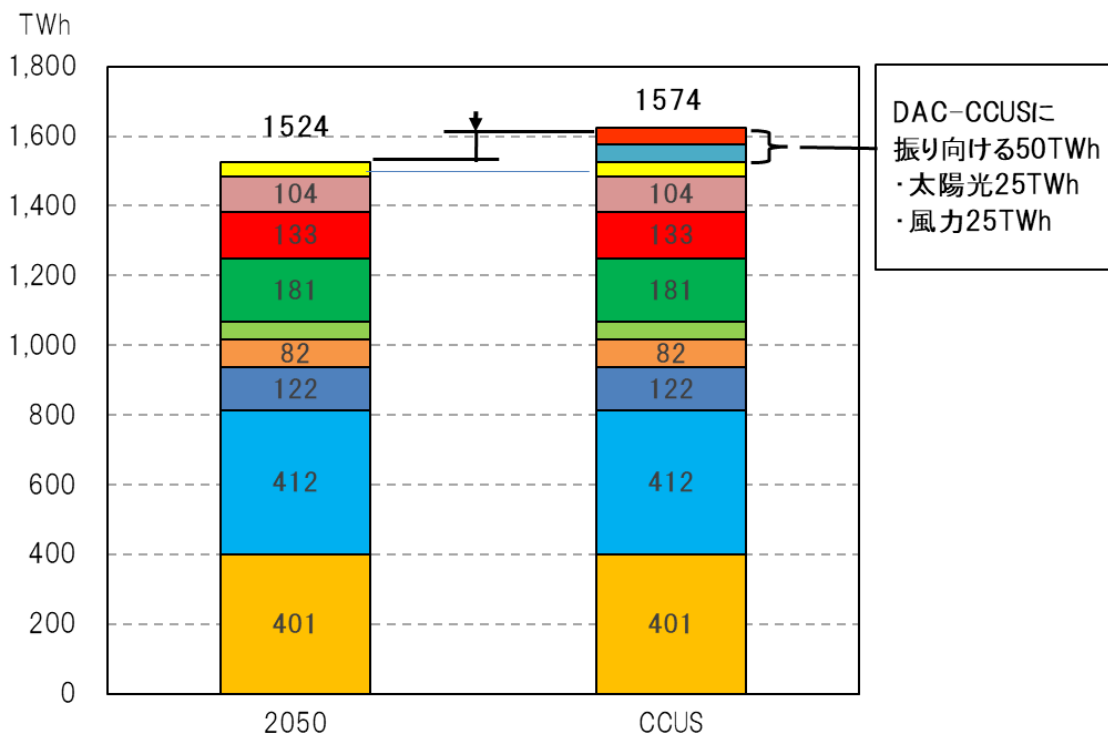
9. CCUS シナリオ

二酸化炭素を排出しないエネルギーシステムを作れたら、それで地球温暖化は解決するのだろうか。2050 年頃に CO₂ 排出がゼロになれば、温暖化問題が解決するというわけではない。すでに排出した CO₂ は大気中に蓄積しており、海水面の温度上昇などはそのままである。そこで、考えられるのは、大気中に蓄積した CO₂ を取り出して処分することである。過去に排出した CO₂ を空気中から取り出すにはどうしたらよいのか。

この大気中から CO₂ を抜き出す技術が開発されている。DAC (ダイレクト・エア・キャプチャ) という技術である。巨大な送風機で大気を直接的に取り込んで化学物質 (吸収材) との接触反応によって CO₂ を吸収する。そして、この吸収剤を繰り返し使うために温度を上げることで吸収した CO₂ をとりだす。取り出した CO₂ はどうするか、一つは CCS (炭素

回収・貯留）であり、地中深くに貯蔵保管する。もうひとつは CCUS であり、水素と反応させてプラスチックや道路舗装材料などの化学材料をつくらせてリサイクル利用を行う。

図 17 2050 年以降の DAC を含むシナリオ



(図では毎年 50TWh ほどの自然エネルギーを DAC 用に使用して CCUS を行う)

大気中から CO₂ を回収するにはエネルギーが必要になるが、太陽光や風力を使えば成り立つ可能性がある。コストがかかるが、気候変動による被害額との比較で実施するかどうかを検討することになるであろう。いまのところ、CCS は、現状の化石燃料の消費を促す恐れがあるので、なかなか賛成を得られない面がある。しかし、再生可能エネルギーが主力エネルギー源となる将来は、CCUS が真剣に検討されるものと予想される。

この DAC のアイデアが発表された後、2010 年にアメリカ物理学会は、分析を行って、技術的には可能だが、CO₂1 トンあたり 600 ドルの費用になると計算した。これで DAC は実現性がないという話になった。ところが、米国のコロンビア大学ではこの研究を続けた。そしてカナダの企業カーボンエンジニアリング社がその実験を開始してもうすでに 10 年もの時間が経っている。ヨーロッパでもスイスの「クライムワークス」という企業が実験設備をつくっている。

そして、フィンランドのラッペンランタ工科大学では、DAC を分析して、設備を大量につくれば、量産効果で低コストにできるので、DAC のコストは CO₂1 トンあたり 100 ドル

以下にできそうだという研究結果を発表している[24]。吸収材のリサイクルにつかう化学反応の温度を 100℃以下にして、ヒートポンプを使って効率をあげると、必要なエネルギー消費が小さくなり、CO₂抽出コストが格段に低下するという。モロッコの気象条件で、太陽光と風力を使ってこの装置を運転することを試算している。再生可能エネルギーのコストが低下しているので、実際に運転するとき、CO₂を排出しないようにできるというわけである。日本でも、将来は、風力や太陽光がある北海道や九州でこのような試みを実施することができのかもしれない。

シナリオを描いてみると図 17 のようになる。太陽光と風力の余剰を 25TWh ずつ、合計 50TWh を利用して、CO₂の回収と水素の製造に充て、化学合成により年間に数百万トンほどの建築材料ができるかもしれない。エネルギー効率が高くなれば生産量は増加する。余裕があれば、エネルギー供給のおおよそ 5%程度を、このような用途に向けることができる。これを長い期間続ければ大気中の CO₂濃度を下げてゆき、最終的には温暖化の影響をゼロにできるかもしれない。

DAC に投入する自然エネルギーは、本来ならば直接にエネルギー消費に振り向けるべきであり、余剰のエネルギーが発生するときのみ意味がある。したがって、2050 年の 100% 自然エネルギーシナリオが実現した後は、日本でも DAC が実際に行われるようになることを期待したい。

10. 結論

2050 年までに、日本では自然エネルギーを中心にした社会を構築することが現実可能であることを検証することができた。国内に自然エネルギー資源は十分にあり、知られている技術を組み合わせてゆけば、エネルギーの自給自足が可能になり、地球温暖化の問題解決に迫ることができる。さらに効率の高い技術の開発を進めることもできよう。そこで、技術以外の問題が重要になる。社会を変えてゆくためには、既存のエネルギー産業を現状からどのようにして変えてゆくかということを検討してゆく必要がある。

謝辞

JUST(Japan's Union of Concerned Scientists on Energy Mix and Climate Target) の各氏から多くの貴重な助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Yukiko Imada et al. (2019) The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming, SOLA, Vol.15A, p8-12
- 2) WWF ジャパン (2017) 「脱炭素社会に向けた長期シナリオ」
- 3) 国立社会保障・人口問題研究所 (2017) 「将来の人口推計」
- 4) 省エネルギーセンター (2020) 「エネルギー経済統計要覧 2020」
- 5) 日本エネルギー経済研究所 (2019) 「Outlook 2020」
- 6) M. Fishedick et al. (2014) Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies, Wuppertal Institute
- 7) 小西雅子 (2020) 「再エネを上手に使う上げ DR 供給側と需要側の連携が鍵に」 地球温暖化 日報ビジネス
- 8) International Energy Agency (2020) Global Energy Review
- 9) 東京都 (2020) 「テレワーク導入率緊急調査結果」(5月11日発表)
- 10) 京都産業エコ・エネルギー推進機構 (2015) 「FEMS 事例集」
- 11) 歌川学 (2015) 「スマート省エネー低炭素エネルギー社会への転換」 東洋書店 p59-68
- 12) 資源エネルギー庁 (2017) 「省エネ法の概要」 p31
- 13) 資源エネルギー庁 (2016) 「2015 年度総合エネルギー統計」
- 14) 環境省 (2018) 「令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する業務委託報告書」
- 15) 日本太陽光発電協会 (2018) 「PV outlook 2017」
- 16) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2014) 「NEDO 再生可能エネルギー技術白書」
- 17) 日本風力発電協会 (2014) 「風力発電ロードマップ:ビジョン」
- 18) Heat pumps & thermal storage technology center of Japan (2007) Heat pumps: Long-awaited way out of global warming
- 19) H.Tsuchiya (2012) Electricity Supply largely from solar and wind resources in Japan, Renewable Energy, Vol.48, p318-325.
- 20) 建築学会 (2008) 「拡張アメダス標準気象データ」
- 21) 発電コスト検証ワーキンググループ (2015) 「長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告」 資源エネルギー庁
- 22) 経済産業省 (2015) 「長期エネルギー需給見通し 2030」
- 23) Eurys energy, Expansive Area of Land
- 24) Mahdi Fasuhi & et al. (2019) Techno-economic assessment of CO2 direct air capture plants, Journal of Cleaner Production, Vol.224, p957-980

参考資料

1) Airbus の水素ジェット飛行機

航空機の CO2 排出を削減する方法としては、バイオマスにするか水素にするか、という二つの選択肢がある。その中間としては、水素とバイオマスから Power To Gas という合成燃料を作る方法もある。再エネ電力が豊富に供給されるようになれば、水を電気分解すれば水素が得られるので、水素のみにできればシンプルになる。2020 年 9 月 22 日ロイターによると、EU のエアバス社は、CO2 排出をゼロにするため、水素で飛ぶ航空機を 2035 年までに製造するという計画を発表した。報道によれば数百人乗りの水素ジェット旅客機が可能ということである。

エアバスの発表では、3 種の設計がある。

- ① ターボファン・エンジンを搭載した機体で、乗客最大 200 人を乗せて 3200 キロメートル以上の航行が可能。ターボファンは燃焼ガスをタービンで高圧にして噴き出して推力を得る方式
- ② ターボプロップ・エンジンを使う機体で、乗客数と航行距離がターボファン型の半分ほどになる。ターボプロップは燃焼ガスでタービンを回転し、8 枚羽根プロペラを回す方式
- ③ 主翼と胴体が一体となったタイプで、3 種の中で最も目を引くデザイン

いずれの機体も、液体水素を燃焼して動力を得る。電力は水素燃料電池から作り出すとしている。エアバスは、実用化のためには空港が大規模の投資をし、燃料補給のためのインフラ整備をする必要があるとしている。これで将来の航空機のエネルギーに関する問題についてのひとつの解答といえる。

付図 1 水素で飛行する 3 種類の設計の航空機 (AIRBUS 社の HP より)



2) 車上 PV

EV と FCV はその屋根に PV を搭載することを想定した。2019 年、NEDO はトヨタのプラグインハイブリッド車‘プリウス’の屋根に効率 34%以上の 860Wの薄型 PV を搭載して都市内で走行実験を行って、駐車と走行中の一日の充電で 44 k m 走行したと報告している。2050 年のシナリオでは、保守的だが、600Wの車上 PV により自動車の年間走行エネルギーの 30%を供給するものとした。

将来は乗用車の走行エネルギーがすべて車上 PV で供給されるようになる可能性がある。

付図 2 車上に PV を搭載した自動車



NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）、シャープ、トヨタ自動車は、高効率太陽電池を搭載した電動車（EV）の公道走行実証を 2019 年 7 月下旬から開始した。シャープは NEDO 事業の一環として開発した世界最高水準の高効率太陽電池セル(変換効率 34%以上)を車載用に約 0.03mm の薄いフィルム状でモジュール化し、太陽電池パネルを製作。トヨタは『プリウス PHV』のルーフ、フード、バックドアなどに同パネルを搭載し、公道走行用実証車を製作した。

実証車は、太陽光による定格発電電力を市販プリウス PHV（ソーラー充電システム装着車）の約 180W に対して、約 4.8 倍の約 860W まで向上。駐車時の駆動用バッテリーへの最大充電電力量（日当たり）は、市販プリウス PHV が EV 航続距離換算で 6.1km 相当のところ、実証車は 44.5km 相当を達成している。さらに、市販プリウス PHV（同）では駐車中のみ可能だった駆動用バッテリーへの充電を、実証車では走行中でも可能にし、EV 航続距離換算で最大 56.3km 相当を充電・給電できるようにした。

2020 年 7 月には、さらに外部充電なしで年間走行可能としている。

「太陽電池を使って充電回数ゼロを目指す」。新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）とシャープは 2020 年 7 月 6 日、変換効率 31.17%を達成した太陽電池モジュールを活用し、

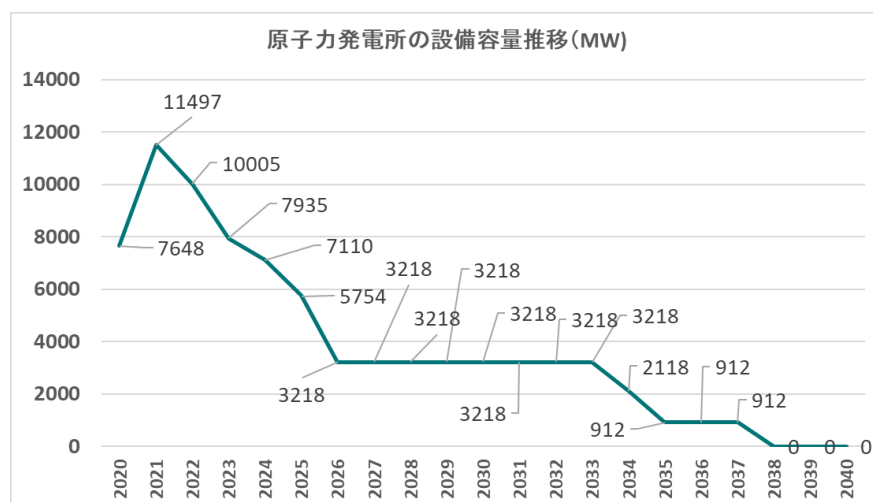
電気自動車（EV）向けの太陽電池パネルを製作したと発表した。「世界最高水準」（シャープ）とうたう同パネルは、1kW 超級の定格発電電力を実現。走行時の距離や時刻を制御すれば、ケーブルによる充電なしで EV を運用可能とみる。

付図 3 太陽電池パネルで 1kW 超級の定格発電電力を実現し、日産自動車の商用 EV「e-NV200」に搭載した（NEDO）



3) 原子力について

付図 4 原子力発電所の設備容量の推移



原発の段階的廃止のシナリオについて （2020 年改訂版）

原子力発電所については、以下の原則に沿って運転停止・廃炉にしていくものとする。

- 1) 新規の原子力発電所は、(着工中の島根3号機と大間も含めて) 建設しない。
- 2) 既存の発電所については、再稼働済み(9基)と適合性審査完了済み(7基)、それに適合性審査申請済み(9基)を稼働させ、運転開始から30年経ったものから順次運転停止し、廃炉にしていける。
- 3) まだ再稼働していない適合性審査完了済み(7基)、適合性審査申請済み(9基)の再稼働日については、以下の前提により設定する。
 - ① 再稼働済みの9基を含む25基の各発電所についてわかっている、適合性審査申請書の提出日、許可日、営業運転開始日、安全対策工事完了日を基に、以下の4つの期間(日)とそれぞれの平均値を算出。
 - (a) 新規性基準の提出日から許可日までの期間(日)
 - (b) 新規性基準の許可日から営業運転開始日までの期間(日)
 - (c) 許可日から安全対策工事完了までの期間(日)
 - (d) 新規性基準の提出日から安全対策工事完了までの期間(日)(=(a)+(c))
 - ② 適合性審査申請済み(9基)については、申請書の提出日に(d)の平均値を足した日付を再稼働日と想定
 - ③ 適合性審査完了済み(7基)については、許可日に(c)の平均値を足した日付を再稼働日と想定

2030年の石炭火力代替に関して、稼働している原子力は、泊、東通、志賀の3ヶ所である。

付表1 原子力発電所の稼働状況

発電所名	号	最大出力 (1,000kW)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
泊	1	579	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
泊	2	579	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
泊	3	912	停止	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中
女川	1	524	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
女川	2	825	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
女川	3	825	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
東通	1	1,100	停止	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中
福島第二	1	1,100	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
福島第二	2	1,100	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
福島第二	3	1,100	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
福島第二	4	1,100	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
柏崎刈羽	1	1,100	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
柏崎刈羽	2	1,100	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
柏崎刈羽	3	1,100	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
柏崎刈羽	4	1,100	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
柏崎刈羽	5	1,100	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
柏崎刈羽	6	1,356	停止	停止	運転中	運転中	運転中	運転中	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
柏崎刈羽	7	1,356	停止	停止	運転中	運転中	運転中	運転中	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
浜岡	3	1,100	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
浜岡	4	1,137	停止	停止	運転中	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
浜岡	5	1,380	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
志賀	1	540	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
志賀	2	1,206	停止	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中
美浜	3	826	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
高浜	1	826	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
高浜	2	826	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
高浜	3	870	運転中	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
高浜	4	870	運転中	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
大飯	1	1,175	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
大飯	2	1,175	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
大飯	3	1,180	運転中	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
大飯	4	1,180	運転中	運転中	運転中	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
島根	2	820	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
伊方	2	566	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
伊方	3	890	運転中	運転中	運転中	運転中	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
玄海	2	559	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
玄海	3	1,180	運転中	運転中	運転中	運転中	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
玄海	4	1,180	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	運転中	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
川内	1	890	運転中	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
川内	2	890	運転中	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止



人と野生生物が共に自然の恵みを
受け続けられる世界を目指して、
活動しています。

together possible™

wwf.or.jp

© 1986 Panda Symbol WWF – WWF World Wide Fund for Nature (Formerly World Wildlife Fund)

® “WWF” is a WWF Registered Trademark

WWFジャパン（公益財団法人 世界自然保護基金ジャパン）

〒108-0073 東京都港区三田1-4-28 三田国際ビル3階 TEL: 03-3769-1711（代表）FAX: 03-3769-1717